



Daniel Taiarol

**Rakennuksen sisäilman laadun seuranta, epäpuhtauksien
mittaaminen sekä epäpuhtauslähteiden paikantaminen
sisätiloissa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 15.11.2015

Valvoja: Professori Heidi Salonen

Ohjaaja: Johanna Salo

Tekijä Jan Daniel Taiarol

Työn nimi Rakennuksen sisäilman laadun seuranta, epäpuhtauksien mittaaminen sekä epäpuhtauslähteiden paikantaminen sisätiloissa

Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka

Pää-/sivue Rakennusmateriaalit ja rakennusfysiikka/talotekniikka **Koodi** Rak-43

Työn valvoja Heidi Salonen

Työn ohjaaja(t) Johanna Salo

Päivämäärä 15.11.2015 **Sivumäärä** 99+11 **Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli selvittää kenttäkokein fysikaalisten olosuhteiden, kuten kosteus- ja lämpöolosuhteiden sekä paine-erojen vaikutusta sisäilman laatuun. Sisäilman laatututkimusten lisäksi työssä kehitettiin uutta tutkimusmenetelmää, ns. pulssikoea. Yksittäisen pulssikokeen kesto oli noin 8 tuntia. Pulssikoe jaettiin viiteen eri vaiheeseen, joissa kussakin vaiheessa muutettiin tutkimuskohteen paineolosuhteita ja korvausilmareittejä. Kaikki kenttäkokeet suoritettiin Espoossa sijaitsevassa toimistorakennuksen yhdessä työhuoneessa. Tenax TA näytteitä kerättiin pulssikokeen yhteydessä 4.12.2014. Pulssikokeita suoritettiin myös 12.12.2014 ja 13.1.2015 online-mittauksien yhteydessä.

Sisäilman laadun mittaukset tehtiin pääosin online-mittauksin, käyttäen Greywolf-tuoteperheen TG 501- ja IQ 610-antureita, FM-801-mittalaitetta ja Thermo pDR-1500-mittalaitetta. Sisäilman laatumittauksilla kerättiin jatkuvaa dataa seuraavista tekijöistä: lämpötila suhteellinen kosteus, TVOC, PM_{2,5}, formaldehydi, ammoniakki ja otsoni. Tutkimuskohteen sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa mitattiin Kimo CP100-merkkisellä ilmanpainemittarilla, jonka mittausdata tallennettiin Eltek 1000 Series Squirrel-dataloggeriin. Tutkimuskohteesta kerättyjen haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) Tenax TA adsorbenttinäytteitä analysoitiin käyttäen yhdistettyä kaasukromatografi-massaspektrometritekniikkaa (GC Clarus 580, MS Clarus 600T). Online-mittaukset suoritettiin useissa eri jaksoissa 12.11.2014 – 15.1.2015.

Lämpöviihtyvyyttä tarkasteltiin kahtena eri ajanjaksona, 14.11.2014 - 19.11.2014 ja 15.12.2014 – 29.12.2014, standardin SFS-EN ISO 7730 mukaisesti. Marraskuussa mitattujen arvojen perusteella sisäilman terminen viihtyvyys oli 53 % ajasta kiitettävällä tasolla (kategoria A) ja 47 % ajasta hyvällä tasolla (kategoria B). Joulukuussa mitattujen arvojen perusteella sisäilman terminen viihtyvyys oli 64 % ajasta kiitettävällä tasolla (kategoria A) ja 36 % ajasta hyvällä tasolla (kategoria B). TVOC-tasot olivat melko alhaisia tutkimuskohteessa, ollen 30...40 µg/m³, formaldehydin ja ammoniakkin pitoisuudet alittivat detektointirajat, ollen häviävän pieniä kaikissa mittauksissa. Pienhiukkastasot olivat tutkimuskohteessa seurantajakson aikana yleisesti ottaen alhaisella tasolla, tyypillisesti 1 – 4 µg/m³ lukuun ottamatta muutamia poikkeuksia.

Pulssikokeen tuloksista määritettiin sisä- ja ulkoilman välisen rakenteen läpi virtaava ilmamäärä sisäilman ollessa alipaineinen ulkoilmaan nähden. Pulssikokeen eri vaiheiden VOC-yhdisteiden määrät muuttuivat huomattavasti, jonka seurauksena pystyttiin arvioimaan epäpuhtauksien kulkureittejä ja lähdettä.

Avainsanat Sisäilman laatu, pulssikoe, terminen viihtyvyys, VOC, PM_{2,5}, CO₂

Author Jan Daniel Taiarol		
Title of thesis Monitoring the indoor air quality, measuring harmful substances and detecting sources of pollution in indoor air		
Degree programme Structural Engineering and Building Technology		
Major/minor Building Materials and Building Physics		Code Rak-43
Thesis supervisor Heidi Salonen		
Thesis advisor(s) Johanna Salo		
Date 15.11.2015	Number of pages 99+11	Language Finland

Abstract

The aim of this project was to measure and explain the effects of physical and chemical conditions on indoor air quality and on the volume of contaminant and pollution in indoor air. Physical conditions contained thermal conditions, moisture content of indoor air and atmospheric pressure difference between indoor and outdoor air. All the measurements and tests were made in one room of an office building situated in Espoo.

The measurements included online monitoring of indoor air temperature and relative humidity (RH), pressure differences between indoor and outdoor air, carbon dioxide (CO₂), total volatile organic compounds (TVOC), fine particles (PM_{2.5}), formaldehyde (CH₂O), ammonia (NH₃) and ozone (O₃). In addition air samples were taken from the test room with Tenax TA sorbent to measure TVOC and make more specific chemical analyses from volatile organic compounds (VOC) detected in the test room.

Thermal comfort of the test room was estimated using calculation methods presented on standard SFS-EN ISO 7730. In this study, to determine the thermal comfort, two periods were considered: 14.11.2014 - 19.11.2014 and 15.12.2014 - 29.12.2014. On the first period mentioned the thermal comfort belonged to category A (the best category) 53 % and to category B 47 % of the time. On the second period mentioned the thermal comfort belonged to category A 64 % and to category B 36 % of the time. The TVOC-concentrations were relatively low all the time, usually between 30...40 µg/m³. Also the concentration of PM_{2.5} was low due to the filtering of inlet and outlet ventilations.

Using the pulse test it was able to estimate the air leaking routes while indoor air had circa 20 Pa lower air pressure compared to outdoor air. Also the concentration of different organic compounds changed considerably in separate stages. With the pulse test it was able to determine the origin of contaminants.

Keywords Indoor air quality, pulse test, thermal comfort, VOC, PM_{2.5}, CO₂

Alkusanat

Diplomityöni suoritettiin Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Rakennustekniikan laitoksen toimesta, osana laitoksen rakennusfysiikan työryhmän sisäilmatutkimuksia. Tutkimustyöni alkoi lokakuussa 2014 ja kenttäkokeita suoritettiin usean kuukauden ajan aina maaliskuulle 2015 asti. Alkuperäisenä suunnitelmana oli kerätä tutkimustietoa kolmesta eri toimistohuoneesta, mutta lopulta jouduttiin tyytymään yhden toimistohuoneen tutkimiseen.

Haluan suuresti kiittää diplomityöni alkuperäistä, edesmennyttä, valvojaa, Aalto-yliopiston professori Martti Viljasta, joka tarjosi minulle tutkimusapulaisen paikkaa ja tätä myöten diplomityöaiheen. Martti toimi suurena inspiraation lähteenä kenttäkokeiden suunnittelussa ja hänen ideoimana kehitimme myös niin kutsutun pulssikokeen, jota käytimme tämän diplomityön tutkimuksissa. Erityiset kiitokset lopulliselle valvojalleni, Aalto-yliopiston sisäilman professorille, Heidi Saloselle, joka avoimin mielen ja empimättä suostui uudeksi valvojakseni.

Lisäksi haluan osoittaa kiitosta ohjaajalleni, Johanna Salolle, joka oli henkisenä tukena ja auttoi erinäisten laitteiden käytön ja tutkimusten yhteydessä sekä kollegalleni, Sander Toomlalle, joka opasti todella monen tutkimuslaitteen ja tietokoneohjelman käytössä ja oli aina valmiina auttamaan teknisten ongelmien korjaamisessa. Valtavat kiitokset myös tohtorikoulutettavalle kollegalleni, Emmanuelle Castagnolille, jonka kanssa suoritimme yhdessä useita sisäilman laadun mittauksia ja ilman häntä ei olisi ollut mahdollista suorittaa kaikkia niitä kenttäkokeita, mitä tässäkin diplomityössä esiintyy. Kiitokset myös tutkijatohtori Raimo Mikkolalle, jonka avustuksella sain sisäilmanäytteiden tutkimusdataa käyttööni. Lopuksi kiitän perheenjäseniäni ja avopuolisoani, jotka kannustivat jaksamaan diplomityön loppuun saattamisessa. Heidän apunsa oli ensiarvoisen tärkeää. Eritoten avopuolisoni, Ida Hirvonen, järjesti toiminnallaan aikaa minun kirjoitustyölle ja kannusti minua saattamaan diplomityöni päätökseen..

Espoo 15.11.2015

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo	5
Käytetyt lyhenteet	7
Määritelmät ja selitteet	8
1 Johdanto	10
2 Rakennusten nykytilanne Suomessa	12
3 Sisäilma ja sen laatu	14
3.1 Asumisterveysasetus	15
3.2 Sisäilmastoluokitus.....	16
3.3 Huonon sisäilman aiheuttamat terveyshaitat ja muut haittavaikutukset.....	17
3.3.1 Sairusrakennusoireet	19
3.4 Sisäilman lämpötila ja terminen viihtyvyys	20
3.4.1 Termisen viihtyvyyden laskennallinen arviointi	22
3.5 Sisäilman epäpuhtaudet	25
3.5.1 Kaasumaiset orgaaniset yhdisteet	26
3.5.2 Aerosolihiukkaset.....	30
3.5.3 Formaldehydi	37
3.5.4 Ammoniakki.....	38
3.5.5 Otsoni ja sen reaktiot sisäilmassa.....	39
4 Sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin vaikuttavat rakennusfysikaaliset tekijät	40
4.1 Rakennus- ja sisustusmateriaalit	41
4.1.1 Rakennusmateriaalien päästöluokitus	44
4.2 Ilmanvaihto ja sisäilman hiilidioksidin taso	45
4.3 Paine-ero rakennusvaipan yli ja rakennuksen ilmatiiveys	49
4.4 Lämpö ja kosteus sisäilmaongelmien aiheuttajana	50
5 Kenttäkokeet ja mittaukset	55
5.1 Tutkimuskohde	55
5.2 Kokeellisen tutkimuksen tavoitteet, käytetyt tutkimuslaitteet ja mittausmenetelmät	56
5.2.1 Tenax TA näytteenotto ja analysointi	56
5.2.2 Sisäilman epäpuhtauksien ja termisten olosuhteiden mittaus	59
5.2.3 Formaldehydipitoisuuden mittaus.....	60
5.2.4 Pienhiukkasten mittaus	60
5.2.5 Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaaminen	61
5.2.6 Tulo- ja poistoilmakanavan virtausnopeus.....	62
5.3 Pulssikokeen mittausjärjestelyt	63
5.3.1 Vaihe 1	64
5.3.2 Vaihe 2	65
5.3.3 Vaihe 3	65
5.3.4 Vaihe 4	66
5.3.5 Vaihe 5	66
5.4 Tutkimustulokset ja tulosten tulkinta	67
5.4.1 Terminen viihtyvyys ja lämpöolosuhteet	69
5.4.2 Sisä- ja ulkoilman väliset paine-erot	73
5.4.3 Ilmanvaihdon ja hiilidioksiditason mittaus	76
5.4.4 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	79

5.4.5	Huoneen vuotoilman määrittäminen ja PM _{2.5} -pitoisuus sisäilmassa	84
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	92
7	Lähteet.....	94
8	Liitteet	100
	Liite A. Pulssikokeen yhteydessä suoritettujen Tenax-näytteiden tulokset 4.12.2014 suoritettussa koesarjassa.....	100
	Liite B. Tutkimuskohteen paineolosuhteiden seurantamittausten tulokset.....	105
	Liite C. Tutkimuskohteen sisäilman pienhiukkaspitoisuuksien mittaustulokset.	106
	Liite D. Pulssikoe 12.12.2014. Pienhiukkasten (PM _{2.5}) pitoisuudet eri vaiheissa	108

Käytetyt lyhenteet

CLO	Vaatetuksen eristyskyvyn arvo
GC	Kaasukromatografi
HTP	Työpaikan ilman epäpuhtauksien sallittu enimmäispitoisuus
IARC	Kansainvälisen syöpätukijärjestö
MS	Massaspektrometri
MVOC	Mikrobiperäinen haihtuva orgaaninen yhdiste
PM2.5	Pienhiukkaset
PM10	Hengitettävät hiukkaset
PPD	Odotettavissa oleva tyytymättömien prosentuaalinen osuus
PPM	Miljoonasosa
PPB	Miljardisosa
PMV	Indeksipohjainen suuren otosryhmän oletettu keskiarvo koskien lämpöviihtyvyyttä
PVC	Polyvinyylikloridi
RH	Suhteellinen kosteus
SBS	Sairas rakennus – oireyhtymä
STM	Sosiaali- ja terveysministeriö
SVOC	Puolihaihtuva orgaaninen yhdiste
TVOC	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä väliltä heksaaniheksadekaani (C6-C16)
VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste kiehumispistevälillä 50 – 250 °C
VVOC	Helposti haihtuva orgaaninen yhdiste
WHO	Maailman terveysjärjestö

Määritelmät ja selitteet

Alipaine: Jonkin kaasumaisen tai nestemäisen seoksen pienempää painetta verrattuna ympäristöönsä. Paineen yksikkö on Pascal [Pa] ja tässä diplomityössä alipaineella viitataan tutkittavan kohteen sisäilman alempaa painetta verrattuna ulkoilmaan. Tilan ollessa alipaineinen ympäröivistä tiloista ilma pyrkii virtaamaan rakenteen epätiiviyiskohtien kautta tilaan.

Aerosolihiukkanen: Aerosoli on kaasun ja siinä leijuvien kiinteiden ja nestemäisten hiukkasten seos eli monifaasisysteemi. Puhuttaessa pelkistä hiukkasista käytetään termiä aerosolihiukkanen tai hiukkanen. Hiukkasten tilavuusosuus koko aerosolista on vähäinen.

Anemometri: Anemometri on mittalaite tuulen tai muun ilmavirtauksen nopeuden mittaamiseen. Tässä diplomityössä on käytetty kuumalanka-anemometria, jonka ilmanvirtausta mittaava osa on hyvin ohut kuuma lanka.

Emissio: Emissio tarkoittaa tässä kaasumaisten yhdisteiden haihtumista rakennus- tai sisustusmateriaaleista ympäröivään ilmaan. Materiaaliemissioon vaikuttavat materiaalin kemialliset yhdisteet, haihtuvan yhdisteen diffuusiokerroin sekä massansiirtokerroin, joka on riippuvainen materiaalin muista ominaisuuksista, kuten massasta ja ominaispinta-alasta. Materiaaliemission voimakkuuteen vaikuttavia ulkoisia tekijöitä ovat muun muassa lämpö ja kosteus sekä ilman liike.

Entalpia: Entalpia on tilafunktio ja entalpian muutos kertoo vakiopaineessa tapahtuvaan prosessiin liittyvän lämpömäärän muutoksen. Entalpian symboli on H ja yksikkö kilojoule [kJ]. Tässä diplomityössä entalpia kuvaa tarkasteltavan ilman ja sen sisältävän vesihöyryn muodostamaa lämpösisältöä.

Ilmanäyte: Tämän diplomityön yhteydessä ilmanäyte tarkoittaa lähinnä VOC-näytettä, joka toimii osana kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden kemiallista analyysia.

Kondensuoituminen: Ilman sisältämän vesihöyryn tiivistymistä rakennusmateriaalin tai rakenteen pinnalle. Kondenssia esiintyy, kun ilman vesihöyrynpitoisuus saavuttaa kylästyskosteuden, jolloin RH on 100 %.

Konvektio: Ilmavirran mukana kulkeutuva massavirta. Massavirta sisältää ilman tyypillisen kaasuseoksen lisäksi vesihöyryä, hiukasmaisia partikkeleita ja muita kemiallisia yhdisteitä.

Kosteusvaurio: Kosteusvaurio on liiallisesta tai pitkäaikaisesta kosteudesta aiheutuva materiaalin tai rakenteen kosteussietokyvyn ylittyminen tai ominaisuuksien muuttuminen siten, että rakenne ei enää palvele tilan käyttäjää tarkoituksenmukaisesti. Kosteusvaurion yhteydessä vaurioitunut rakenne tai sen osa tulee korjata tai vaihtaa.

Paine-ero: Ilmanpaineen erotus kahden rajatun ilmatilan välillä. Rakennuksiin paine-eroja aiheuttavat tuuli, sisä- ja ulkoilman väliset lämpötilaerot ja ilmanvaihto.

Pulssikoe: Viisiosainen koesarja, jossa tutkittavan kohteen sisätilan paineolosuhteita muutetaan sekä samanaikaisesti suoritetaan ilmanlaadun mittauksia. Ensimmäisessä vaiheessa ovat normaalit käyttötilan ilmanvaihdon tehot, toisessa vaiheessa kohteen tulo- ja poistoilma sammutetaan, kolmannessa vaiheessa suoritetaan alipaineistusjakso, neljännessä vaiheessa huone on ylipaineinen ja viidennessä vaiheessa ikkunat täysin auki. Kussakin vaiheessa otetaan VOC-näytteet ja mitataan ilman epäpuhtauksien määrää.

Retentioaika: Aika, jolloin yhdiste eluoituu kolonnista eli yhdiste on kulkenut koko kromatografi-laitteiston läpi. Erottuminen tapahtuu lämpötilakontrolloidussa uunissa olevassa kolonnissa, ohuessa putkessa. Retentioajan perusteella voidaan arvioida yhdisteen koostumusta. Yhdisteiden erottumiseen vaikuttavia kemiallisia ja fysikaalisia vakioita ovat muun muassa yhdisteen molekyylin koko ja polaarisuus sekä ajoliuoksen koostumus ja virtausnopeus.

Sisäilma: Rakenteiden rajoittama huoneilma

Sisäilmaongelma: Terveyttä tai turvallisuutta vaarantava puute tai ongelma rakennuksen sisäilmassa, jolla on negatiivinen vaikutus rakennuksen käyttäjän terveyteen ja viihtyvyyteen.

Ylipaine: Jonkin kaasumaisen tai nestemäisen seoksen korkeampaa painetta verrattuna ympäristöönsä. Paineen yksikkö on Pascal [Pa] ja tässä diplomityössä ylipaineella viitataan tutkittavan kohteen sisäilman korkeampaa painetta verrattuna ulkoilmaan. Tilan ollessa ylipaineinen ilma pyrkii virtaamaan tilasta rakenteen epätiiviyskohtien kautta ympäröiviin tiloihin tai ulos.

1 Johdanto

Sisäilman huonon laadun on jo pitkään arvioitu olevan yksi maamme suurimmista ympäristöterveysongelmista (Reijula, Ahonen ym. 2012). Tämän lisäksi sisäilman laatu on noussut viime vuosina keskeiseen asemaan rakennusten korjaushankkeissa ja korjaustarpeen määrittämisessä sekä taloteknisten järjestelmien uusimisessa. Tästä johtuen on tärkeää löytää uusia menetelmiä sisäilmaongelmaisten rakennusten haitallisten aineiden lähteen paikantamiseen, sekä kiinteistöjen korjaustavan valintaan. Sisäilman laatuksymykset on otettava vakavasti huomioon, sillä ne eivät pidä sisällään vain teknisiä ja taloudellisia tekijöitä vaan vaikuttavat myös rakennuksen käyttäjän hyvinvointiin ja terveyteen.

Teollistuneissa maissa ihminen viettää tyypillisesti 80...95 % ajastaan sisätiloissa (Villberg, Saarela ym. 2004, Bluysen 2013, Seppänen 2004), hengittäen päivittäin useita tuhansia kuutioita sisäilmaa. Mikäli sisäilman laatu ei ole kunnossa, voi siitä aiheutua tilojen käyttäjille merkittävää terveyshaittaa. Rakennuskannan ikäjakaumasta johtuen, on tulevina vuosina odotettavissa aikaisempaa enemmän korjaushankkeita (Holmijoki 2013, Vainio, Jaakkonen ym. 2002), jolloin myös rakennusteollisuuden on painotettava totuttua enemmän korjausrakentamiseen ja vähenevissä määrin uudisrakennusten tuottamiseen. Rakennuskantaan kohdistuvista korjaushankkeista suuri määrä kohdistuu sisäilmaongelmaisten rakennusten korjauksiin ja erityisesti rakennuksen käyttöön loppumisen näyttää johtavan sisäilmaongelmiin, joista terveyden kannalta merkittävimpiä osatekijöitä ovat kosteus- ja homevauriot (Reijula, Ahonen ym. 2012). Esimerkiksi vuonna 2010 merkittävien kosteusvaurioiden aiheuttamat kertaluontoiset korjauskustannukset olivat 12,5...16,7 % kaikista Suomen korjauskustannuksista (Reijula, Ahonen ym. 2012). Tämä takia uusia tutkimusmenetelmiä tulisi pyrkiä löytämään sisäilmaongelmien luonteen, laadun ja laajuuden määrittämisessä. Lisäksi sisäilmaongelmista aiheutuvat kansanterveydelliset ongelmat ovat tutkimusten mukaan nousseet viimeisten vuosien tai vuosikymmenien aikana (Reijula, Ahonen ym. 2012), mikä on oletettavasti lisännyt myös terveydenhuollon kautta aiheutuvia yhteiskunnallisia kustannuksia.

Sisäilmaongelmia aiheuttavat erilaiset tekijät. Näitä tekijöitä voivat olla mm. ilmanvaihdon vähentäminen rakennuksissa energiankulutuksen minimoimiseksi (Seppänen 1999, Sundell, Levin ym. 2011, Hänninen, Asikainen 2013, Järnström, Saarela 2005), erilaisten rakennus- ja sisustusmateriaalien emissiot (Villberg, Saarela ym. 2004, Salonen, Lappalainen ym. 2011a), rakennuksen heikko kosteustekninen toimivuus (Vinha 2014, RIL 250-2011 2011), rakennuksen ylläpidon laiminlyönti sekä rakentamisvaiheen tiukat aikataulut, jolloin rakennuskosteutta saattaa joutua haitallisissa määrin rakenteisiin ja rakennusvirheet saattavat kasvaa. Uudet rakenneratkaisut ovat kerroksellisuutensa takia herkeämpiä suunnittelu-, rakennus- ja käyttö-virheille vanhoihin massiivirakennuksiin verrattuna (Reijula, Ahonen ym. 2012). Suunnittelussa voi olla puutteita uusien menetelmien ja materiaalien käytössä ja uusien määräysten toteuttamisessa kosteusteknisesti toimivilla ratkaisuilla, minkä takia suunnittelijoita on syytä kouluttaa ja perehdyttää riittävästi, jotta turvallinen ja terveellinen sisäilma saavutetaan jatkossa.

Suomessa ja muuallakin maailmassa on julkistettu erilaisia oppaita sisäilmaongelmien selvittämisen hyvistä käytännöistä ja sisäilman epäpuhtauksien mittaamisesta, mutta siitä huolimatta ongelman aiheuttaja jää usein selvittämättä ja korjaustoimenpiteet epäonnistuvat (Salonen, Lappalainen ym. 2011a, Meklin ym. 2008, STM 2003). Reijulan ym. (2012) mukaan sisäilmakorjausten epäonnistumisen yleisimmät syyt ovat vastuiden hajauttaminen ja heikko tiedonkulku hankkeen eri vaiheissa ja eri toimijoiden välillä (Reijula, Ahonen ym. 2012). Sisäilmaselvitykset on saatettu kohdistaa väärin tai vailla

perustetta ja tutkimustulosten epäonnistunut kohdentaminen tai tulkinta voi johtaa korjauskierteeseen (Hekkanen 2006). Sisäilmatutkimusten analyysit eivät aina kohtaa korjausurakoitsijoiden kanssa, sisäilmatutkimukset voivat olla vajavaisia, yleisesti käytössä olevat tutkimustavat eivät ole riittäviä sisäilmassa ilmenevän haitan toteamiseksi tai taloudelliset resurssit eivät riitä kattaviin tutkimuksiin ja toimenpiteisiin (Hekkanen 2006). Tulevaisuudessa tarvitaan hallitumpia kokonaisuuksia sisäilmaongelmien ratkaisemiseksi. Sisäilmatutkimuksista on kyettävä siirtymään onnistuneemmin toimenpide-ehdotuksiin ja sitä kautta korjaussuunnitelmiin. Tarvitaan entistä helpommin toteutettavia tutkimustapoja, vähemmän aikaa vieviä mittauksia ja selkeämpiä keinoja sisäilmaongelmaa aiheuttavien tekijöiden paikantamisessa.

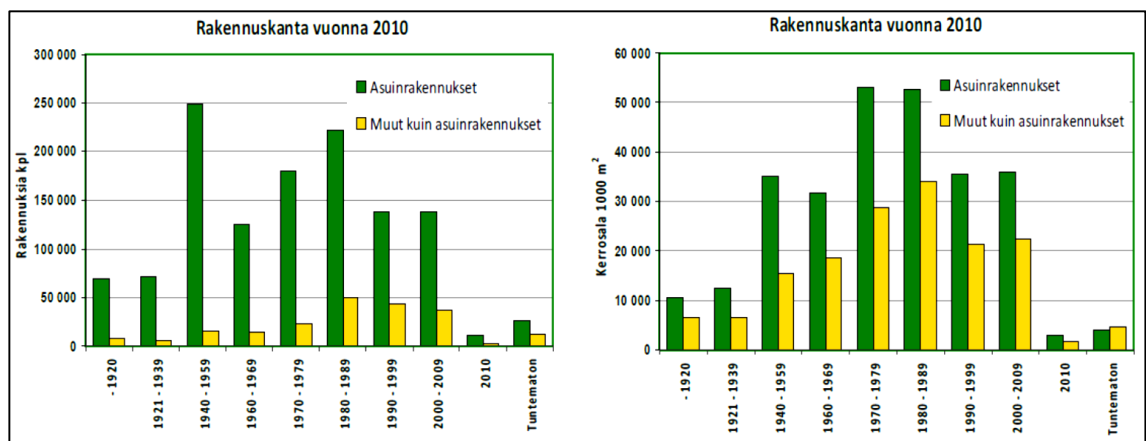
Tämän diplomityön teoriaosassa käsitellään yleisellä tasolla sisäilman merkitystä ihmisen hyvinvointiin ja terveyteen, sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä, sekä sisäilman epäpuhtauksien mittausten menetelmiä. Teoriaosassa tuodaan esille kirjallisuuskatsausten mukaan merkittävimpiä sisäilman laatutekijät, joihin luetaan muun muassa sisäilman lämpötila, kosteus sekä kaasumaiset, hiukkasmaiset, kemialliset ja mikrobiologiset epäpuhtaudet. Tämän lisäksi tarkastellaan erilaisia sisäilman laatuongelmiin johtaneita tekijöitä ja syitä rakennusteknisestä näkökulmasta.

Kenttäkokeiden tavoitteena oli löytää uusia lähestymistapoja arvioimaan tutkittavan tilan sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä, sekä sisäilmassa esiintyvien haitallisten aineiden havaitsemiseen ja haitta-ainelähteen paikallistamiseen käyttäen sisäilmatutkimuksissa yleisesti tunnettuja tutkimuslaitteita. Kenttätutkimusosio koostuu sisäilmatutkimuksista, joita tehtiin yhdessä toimistorakennuksen työhuoneessa Espoossa. Kenttätutkimuksissa kerättiin tietoa tutkimuskohteen rakennusfysikaalisista ominaisuuksista käyttäen hyväksi monimuotoista tutkimusdataa. Tutkimustulosten avulla saatujen johtopäätösten myötä on mahdollista löytää uusia keinoja sisäilman haitallisten aineiden lähteen paikantamisessa, sekä mahdollisten sisäilman laatua heikentävien rakenteellisten tai taloteknisten vikojen luonteen määrittämisessä. Tutkimuksen ja kenttäkokeiden yhteydessä on tärkeää löytää syy-yhteys sisä- ja ulkotilan fysikaalisten tekijöiden ja ainepitoisuuksien välille, jotta kyseisiä ilmiöitä olisi mahdollista ennakoida, mallintaa ja jalostaa mittausten menetelmiä tulevia tutkimuksia tai muita käyttötarkoituksia varten.

2 Rakennusten nykytilanne Suomessa

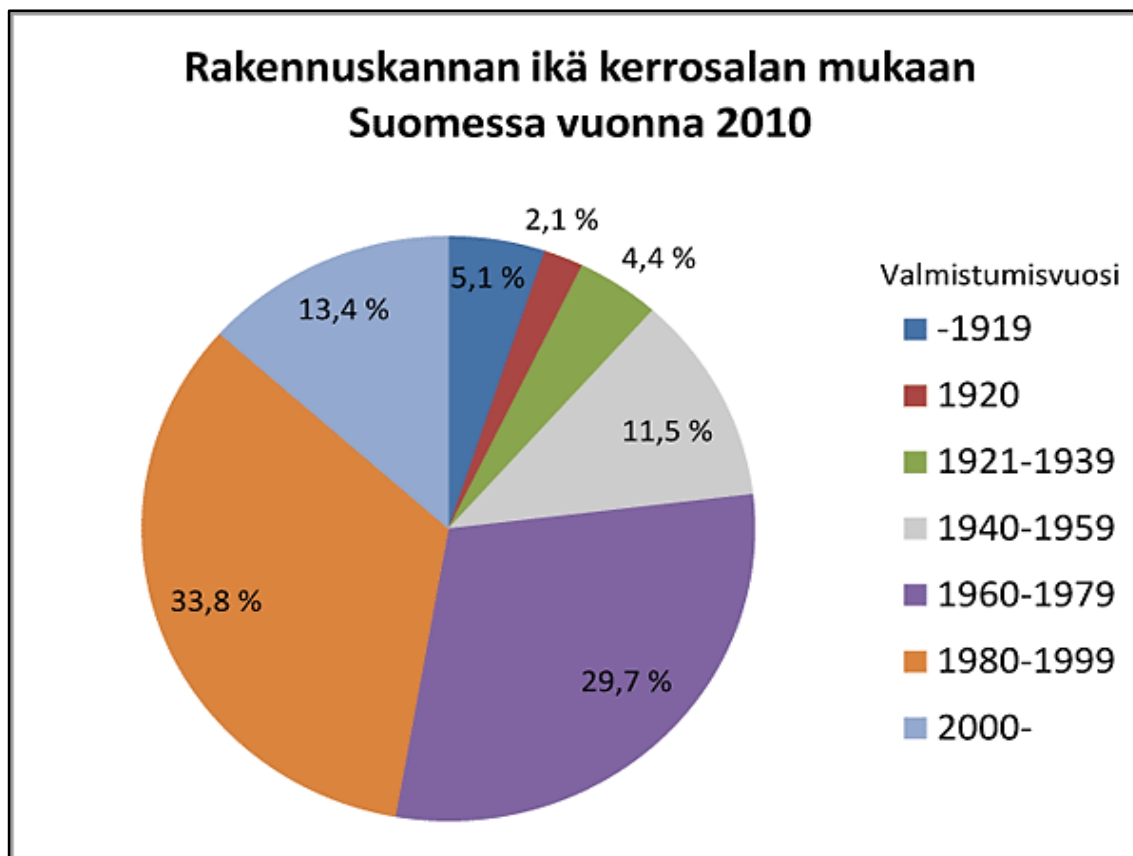
Suomen rakennuskanta on noin 1,45 miljoonaa rakennusta, joista asuinrakennuksia on 85 % ja muita rakennuksia 15 %. Kerrosalalla ilmaistuna rakennuskanta on noin 434 miljoonaa neliötä, joista 274 miljoonaa eli 63 % on asuinrakennuksissa ja 160 miljoonaa eli 37 % muissa rakennuksissa. Rakennuskanta on merkittävä osa Suomen kansanvarallisuutta. Kansanvarallisuus vuonna 2010 oli 775 mrd. €, josta asuinrakennukset olivat 217 mrd. € ja muut talonrakennukset olivat 132 mrd. €. (Reijula, Ahonen ym. 2012) Rakennuskantaa korjattiin vuonna 2000 noin 5 500 miljoonalla eurolla, joka on koko talonrakennustuotannosta noin 40 prosenttia ja korjausrakentamisen volyymi on kasvanut 90- ja 2000-luvun aikana 3–4 prosentin vuosivauhtia (Vainio, Jaakkonen ym. 2002). Uudisrakentaminen kasvatti rakennuskantaa vuonna 2010 11,6 mrd. €:lla ja rakennuskantaa korjattiin 9,6 mrd. €:lla kyseisenä vuonna (Holmijoki 2013). Korjausrakentamisen määrä on siis kasvanut huomattavasti viimeisien vuosien aikana. Siinä missä uudisrakentamisen kustannukset ovat lisääntyneet noin 40 % kymmenen vuoden aikana, samaan aikaan korjausten kustannusten määrä on lisääntynyt yli 70 % (Holmijoki 2013).

Eräät tekniset korjaukset tulevat ajankohtaisiksi rakennuksen iän mukana. Monissa teknisissä korjauksissa rakennuksen kriittinen ikä on noin 30 vuotta, minkä lisäksi joidenkin rakenteiden käyttöikä on suunniteltu 50 vuodelle. Kun rakennuskantaa tarkastellaan tästä näkökulmasta, havaitaan iältään yli 30 vuotiaan kannan osuuden lisääntyneen 1990-luvulla 30 prosentista 40 prosenttiin. (Vainio, Jaakkonen ym. 2002). Kuvasta 1 ilmenee tämänhetkinen rakennusten ikäjakauma Suomessa.



Kuva 1. Asuinrakennusten ja muiden kuin asuinrakennusten lukumäärät sekä kerrosalat rakentamivuosi- ja -luokittain vuonna 2010. Ei sisällä vapaa-ajan asuinrakennuksia eikä maa- ja metsätalouden tuotantorakennuksia. (Holmijoki 2013)

Tilastoidut rakennuskannan ikäjakaumat kerrosalan mukaan Suomessa vuonna 2010 on esitetty kuvassa 2. Yli 50 vuotiaiden rakennusten osuus on Suomessa noin 77 % kerrosalan mukaan. Yli 30 vuotiaiden rakennusten osuus 2010-luvun alussa ylitti 50 %:n rajan (Holmijoki 2013). Tätä tietoa vasten on selvää, että tekniseen korjausikään on tullut ja on vielä tulossa runsaasti rakennuksia lähivuosina.



Kuva 2. Tilastoidut rakennuskannan ikäjakaumat kerrosalan mukaan Suomessa vuonna 2010 (Vaahtolampi, Murto-orava 2011).

Huomattavassa osassa Suomen rakennuskannassa on kosteus- ja homeongelmia. Syynä niihin ovat muun muassa 1960-luvulta lähtien yleistyneet kosteusvauriolle alttiit rakenteet ja materiaalit sekä suunnittelu- ja rakentamisprosessin pirstaleisuus, huolimattomuus, rakennusvirheet sekä työmaasuojauksen puutteellisuus. Lisäksi rakennusten vääränlainen käyttö ja kunnossapidon laiminlyönti aiheuttavat rakennuksiin kosteusvaurioita. (Holopainen, Reijula 2012) Yleisen huolen takana ovat muun muassa 1970- ja 1980-luvuilla tehtyjen energiasäästötoimenpiteiden aiheuttamat sisäilmaongelmat (Säteri, Backman 2012). Kosteusongelmat aiheuttavat usein myös muita sisäilman haittatekijöitä kuin mikrobivaurioita, esimerkiksi kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden emissioita. Nykypäivänä rakennusten sisäilman laatu on noussut merkittävään rooliin yhteiskunnassamme sisäilmakorjausten määrän kasvaessa. Erityisesti rakennuksen käyttöiän loppuminen näyttää johtavan sisäilmaongelmiin, joista terveyden kannalta merkittävimpiä osatekijöitä ovat kosteus- ja homevauriot. (Reijula, Ahonen ym. 2012)

Ennakoivan toiminnan mukaisesti kuntien ja valtion avustusten tulisi kohdentua erityisesti ennaltaehkäisevään ja ennakoivaan kiinteistönpitoon. Kun kunnossapitoon osoitetut määrärahat ovat olleet vuosia alimitoitettut, korjausvelka on kasvanut ja ongelmat realisoituvat rakennuksen käyttäjän oireiluna ja terveyden menettämisinä. Valtion tukijärjestelmät eivät saa tukea korjausvelvoitteitaan laiminlyönteitä ja peruskorjauksia toistuvasti siirtäneitä tahoja, vaan tuen pitää kannustaa rakennuksen elinkaaren kannalta korjaushankkeiden oikea-aikaiseen toteuttamiseen. (Reijula, Ahonen ym. 2012) Edelleen tarvetta löytyy myös tutkimuksille onnistuneen sisäilmakorjauksen ja oikeiden tutkimusmetodien kehittämiseksi, jotta tulevaisuudessa pystyttäisiin selvittämään sisäilmaongelmia taloudellisesti kannattavasti ja terveystieteelliset huomio ottaen oikealla tavalla.

3 Sisäilma ja sen laatu

Useita säädöksiä on asetettu rakentamisen ja suunnittelun tasolle sekä sisäympäristön eri tekijöiden tavoitearvoille, mutta yhteiskunnassamme on edelleen suurta huolta aiheuttava sisäympäristöongelmien korkea määrä. Sisäilman huonon laadun on jo pitkään arvioitu olevan yksi maamme suurimmista ympäristöterveysongelmista (Reijula, Ahonen ym. 2012). Terveysturvallisuuslain (763/94) 26 §:n mukaan asunnon ja muun sisätilan sisäilman tulee olla puhdasta eivätkä lämpötila, kosteus, melu, ilmanvaihto, valo, säteily, mikrobit ja muut vastaavat tekijät saa aiheuttaa terveyshaittaa asunnossa ja muussa tilassa oleskeleville. Edellä mainitulla puhtaudella tarkoitetaan esimerkiksi sisäilman sisältäviä kemiallisia epäpuhtauksia sekä hiukkasia ja kuituja (STM 2008).

Ihmisen kokema sisäilma koostuu kaikista sellaisista fyysisistä ja kemiallisista tekijöistä, jotka vaikuttavat ihmisen aistimukseen ja tuntemukseen. Ihmisen kokeman tuntemuksen lisäksi on olemassa tekijöitä, jotka vaikuttavat sisäilman laatuun huolimatta siitä, aiheuttavatko nämä tekijät oireita ihmiselle. Rakennusten tehtävänä on tarjota ihmisille terve ja viihtyisä sisäympäristö asumista tai työskentelyä varten. Rakennuksen sisällä, sisäympäristössä, on oltava miellyttävä lämpötila, siihen on tuotava riittävästi raikasta ilmaa, siinä ei saa esiintyä vetoa, kosteuden on oltava sopiva ja sisäilman epäpuhtauksien määrän on oltava riittävän pieni (STM 2003). Ihminen havainnoi ja aistii sisäilmaa tunnetasolla ja tulkitsee sen laatua käyttäen hyväksi muun muassa nenäontelon hajuaistia sekä yleisesti kemiallista aistimusta esimerkiksi keholla, limakalvoilla, nenässä silmissä ja kurkussa sijaitsevilla tuntohermoilla. Hajuaistilla ihminen voi tunnistaa monia epämiellyttäviä tai haitallisia sisäilman laatu tekijöitä, kun taas yleiset kemialliset aistit ovat sensitiivisiä sadoille tai jopa tuhansille kemiallisille yhdisteille, joita sisäilmassa saattaa esiintyä (Berglund, Johansson ym. 1982).

Sisäilman laadulla on merkittävä vaikutus hengitystielinsairauksien, allergia- ja astmaoireiden esiintymiseen, infektiosairauksien leviämiseen, kemialliseen herkkyyteen ja työn tekijöiden tuottavuuteen (Salonen, Lappalainen ym. 2011b). Se kuinka ihminen kokee sisäilman tai sen laadun riippuu yksilöllisistä asioista ja eri henkilöiden tuntemukset voivat poiketa toisistaan hyvinkin paljon. Esimerkiksi lämpöaistimukset voidaan kokea eritasoisina eri henkilöiden välillä. Nämä yksilölliset erot voivat johtua ihmisten erilaisista tottumuksista, geneettisestä taustasta, kuten elimistön aineenvaihdunnan tasosta, tai vaikkapa tunnesidonnaisista seikoista.

Sisäilman laadun arviointia varten sekä sisäilmaongelmien tutkimusmetodien avuksi on julkaistu lukuisia oppaita ja lainvoimaisia säädöksiä. Sisäilmaongelmia esiintyy kuitenkin runsaasti, eikä ongelmiin useinkaan löydy yksiselitteisiä syitä, ongelman aiheutuessa useiden eri tekijöiden vaikutuksesta. Näin ollen myös ongelman ratkaisut saattavat olla hataralla pohjalla, mikä heikentää esimerkiksi sisäilmakorjausten onnistumisen mahdollisuutta.

Rakennusten terveysvaikutuksista, erityisesti päiväkotien, koulujen ja sairaaloiden kosteus- ja homeongelmista on kirjoitettu runsaasti (Meklin ym. 2008, Reijula, Ahonen ym. 2012). Rakennusten terveysvaikutukset riippuvat toisaalta rakennuksen rakennusteknisestä kunnosta ja sisäilman laadusta ja toisaalta rakennuksen käyttäjien rakennuksessa viettämästä ajasta ja heidän terveydentilaan vaikuttavasta historiasta (Holmijoki 2013). Mikäli hyvä sisäilman laatu halutaan saavuttaa ja ylläpitää on syytä tietää kaikki siihen vaikuttavat olennaisimmat tekijät, kehittää ja soveltaa menetelmiä, joilla hyvä sisäilman laatu saadaan aikaiseksi sekä tunnistaa tärkeimmät ihmisen aistimukseen ja terveyteen

vaikuttavat olosuhteet ja niiden tekijöiden hallinta. On syytä tiedostaa, että pienilläkin orgaanisten kaasumaisten yhdisteiden konsentraatioilla voi olla suuria terveyteen ja hyvinvointiin haitallisesti vaikuttavia seuraamuksia, mikäli ilmassa esiintyy sellaista yhdistettä, jolla on voimakas vaikutus esimerkiksi ihmisen hermostoon.

3.1 Asumisterveysasetus

Sosiaali- terveysministeriö on 15.5.2015 voimaan astuneella asumisterveysasetuksellaan säätänyt uusia toimenpiderajoja määrätyille sisäilman epäpuhtauksille, sekä fysikaalisille olosuhteille. Lisäksi asumisterveysasetus on uudistanut terveydensuojeluviranomaisten apuna käytettävien ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimukset, joilla varmistetaan asiantuntijoiden riittävä pätevyys sisäilmaongelmaisten rakennusten tutkimuksissa. Asumisterveysasetus pohjautuu suurelta osin jo olemassa olevaan STM:n julkaisemaan asumisterveysohjeeseen, sekä vallitseviin käytäntöihin rakennusten terveyshaittojen selvittämisessä.(STM 2015)

Tämän diplomityön kannalta oleelliset asetukset kohdistuvat sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden, formaldehydin ja hiukkasmaisten epäpuhtauksien sallituille enimmäisarvoille ja toimenpiderajoille. Tämän lisäksi asumisterveysasetuksessa on säädetty rakennusten ilmanvaihdolle, sisäilman hiilidioksidipitoisuudelle ja lämpötilalle raja-arvot. Toimenpiderajalla tarkoitetaan altisteen pitoisuutta, mittaustulosta tai ominaisuutta, jolloin sen, kenen vastuulla haitta on, tulee ryhtyä terveydensuojelulain 27 §:n tai 51 §:n mukaisiin toimenpiteisiin terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa sen poistamiseksi tai rajoittamiseksi.(STM 2015)

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tolueenivasteella lasketun kokonaispitoisuuden (TVOC) toimenpideraja huoneilmassa on $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Yksittäisen haihtuvan orgaanisen yhdisteen tolueenivasteella lasketun pitoisuuden toimenpideraja huoneilmassa on $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lisäksi asetuksessa on erilliset toimenpiderajat taulukon 1 yhdisteille. Sisäilman formaldehydipitoisuuden vuosikeskiarvo ei saa ylittää $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja lyhyen ajan keskiarvopitoisuus 30 minuutin mittauksen aikana ei saa ylittää $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pienhiukkasten ($\text{PM}_{2.5}$) pitoisuus sisäilmassa 24 tunnin mittauksen aikana saa olla enintään $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.(STM 2015)

Taulukko 1. Asumisterveysasetuksessa määrätyt toimenpiderajat TXIB-, 2EH-, naftaleeni- ja styreenipitoisuudelle (STM 2015).

Yhdiste	Toimenpideraja
2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaalidioli di-isobutyraatti (TXIB)	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2-etyyli-1-heksanoli	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Naftaleeni	ei saa esiintyä hajua, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Styreeni	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Asumisterveysasetuksessa on säädetty ilmanvaihdon ulkoilmavirralla vähimmäisarvot. Ilmanvaihdon ulkoilmavirran tulee olla rakennuksen käytön mukaisesti riittävä ja sen laadun tulee olla riittävän puhdasta. Ilmanvaihto tulee järjestää siten, että sisäilma vaihtuu koko oleskeluvyöhykkeellä. Asetuksen mukaan asunnon ilmanvaihdon ulkoilmavirran tulee olla käytön aikana vähintään $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}$ neliömetriä kohden kaikissa asuinhuoneissa ja vähintään $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohden kouluissa päiväkodeissa, sekä muissa vastaavissa

oleskelutiloissa. Mainittujen ulkoilmavirtojen raja-arvot voidaan alittaa, mikäli varmistetaan, etteivät sisäilman epäpuhtauspitoisuudet tai lämpötila nouse liian suuriksi, aiheuttaen terveyshaittaa tilan käyttäjälle. Lisäksi kosteus ei saa nousta ulkoilmavirran alentamisen myötä niin suureksi, että se voisi aiheuttaa rakenteissa mikrobikasvun riskiä. Ulkoilmavirta ei saa kuitenkaan alittaa arvoa $4 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{hlö}$. (STM 2015)

Sisäilman lämpötilalle on asetettu toimenpiderajat asuntojen, sekä muiden rakennusten oleskelutiloille. Asunnoissa huoneilman lämpötilan raja-arvot lämmityskaudella ovat $+18 \dots 26 \text{ C}^\circ$ ja lämmityskauden ulkopuolella $+18 \dots 32 \text{ C}^\circ$. Huoneilman lämpötilan toimenpiderajat lämmityskaudella palvelutaloissa, vanhainkodeissa, lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja vastaavissa tiloissa ovat $+20 \dots 26 \text{ C}^\circ$. Toimenpiderajat lämmityskauden ulkopuolella lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja muissa vastaavissa tiloissa on $+20 \dots 32 \text{ C}^\circ$. Vastaavat raja-arvot palvelutaloissa, vanhainkodeissa ja muissa vastaavissa tiloissa on $+20 \dots 32 \text{ C}^\circ$. (STM2015)

3.2 Sisäilmastoluokitus

Sisäilmayhdistys ry on julkaissut suomalaisia sisäilmastoluokituksia vuodesta 1995 lähtien, joista viimeisin voimassa oleva luokitus on "Sisäilmastoluokitus 2008". Luokituksessa on koottuna sisäilman laadun kannalta tärkeät tekijät, sekä kuinka niihin voidaan vaikuttaa jo rakennusvaiheessa ja teknisillä ratkaisuilla niin, että saavutetaan mahdollisimman korkealaatuinen sisäilman laatu rakennuksen mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Sisäilmastoluokitus on sisäilmayhdistyksen rakennusosalalle luoma vapaaehtoinen järjestelmä, eivätkä sen määrittelemät luokitukset ole sidoksissa rakentamismääräyksiin, eli annetut tavoitearvot ovat alan omia suosituksia (Sisäilmayhdistys 2001). Sisäilmastoluokitus 2008 on yksi RT-kortistoon kuuluvista ohjeista, joka sisältää sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Luokitus on kolmitasoinen, missä laatuluokat S1, S2 ja S3 kuvaavat sisäilmaston laatua niin, että luokka S1 on paras ja luokka S3 heikoin laatuluokka. Luokka S3 vastaa pitkälti sisäilman laatutekijöiden viranomais-säädöksiä (Sisäilmayhdistys 2009). Alla on selostettuna kuvaukset eri sisäilmastoluokista.

- S1, Yksilöllinen sisäilmasto:
Tilan sisäilman laatu on erittäin hyvä eikä tiloissa ole havaittavia hajuja. Sisäilmaan yhteydessä olevissa tiloissa tai rakenteissa ei ole ilman laatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä. Lämpöolot ovat viihtyisät eikä vetoa tai ylilämpenemistä esiinny. Tilan käyttäjä pystyy yksilöllisesti hallitsemaan lämpöoloja. Tiloissa on niiden käyttötarkoituksen mukaiset erittäin hyvät ääniolosuhteet ja hyviä valaistusolosuhteita tukemassa yksilöllisesti säädettävä valaistus.
- S2, Hyvä sisäilmasto:
Tilan sisäilman laatu on hyvä eikä tiloissa ole häiritseviä hajuja. Sisäilmaan yhteydessä olevissa tiloissa tai rakenteissa ei ole ilman laatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä. Lämpöolot ovat hyvät. Vetoa ei yleensä esiinny, mutta ylilämpeneminen on mahdollista kesäpäivinä. Tiloissa on niiden käyttötarkoituksen mukaiset hyvät ääni- ja valaistusolosuhteet.
- S3, Tyydyttävä sisäilmasto:
Tilan sisäilman laatu ja lämpöolot sekä valaistus- ja ääniolosuhteet täyttävät rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset.

Sisäilmastoluokitus ei ole viranomaisohje eikä näin ollen sinällään noudatettava määräys, mutta on syytä muistaa, että luokituksessa mainitut asiat muuttuvat sopimusosapuolia sitoviksi siinä muodossa, kuin niihin yksilöidysti viitataan hankkeen sopimusasiakirjoissa (Säteri 2008). Suomen rakennusmääräyskokoelman D2 mukaan laaditut rakennuksen sisäilman haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet vastaavat hyvin pitkälti sisäilmastoluokan S3 raja-arvoja, kuten myös lämpöolosuhteiden raja-arvot. Muiden epäpuhtauksien, eli sellaisten joiden enimmäisarvoja ei ole määritelty rakennusmääräyskokoelmissa, pitoisuus voi tavanomaisissa tiloissa olla yleensä korkeintaan 1/10 työpaikkojen ilman haitalliseksi tunnetuista pitoisuuksista (HTP), kun yksittäisen aineen vaikutus on täysin hallitseva (SRMK D2 2012). Edellä mainittuja HTP-arvoja on lueteltu teoksessa Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2014:2 (HTP-arvot), missä Sosiaali- ja terveysministeriö on asetuksellaan haitta-aineiden pitoisuuksista (268/2014) vahvistanut työpaikan ilman epäpuhtauksien haitalliseksi tunnetut pitoisuudet (HTP-arvot) ja vastaavat biologisten altitusindikaattorien raja-arvot (STM 2014).

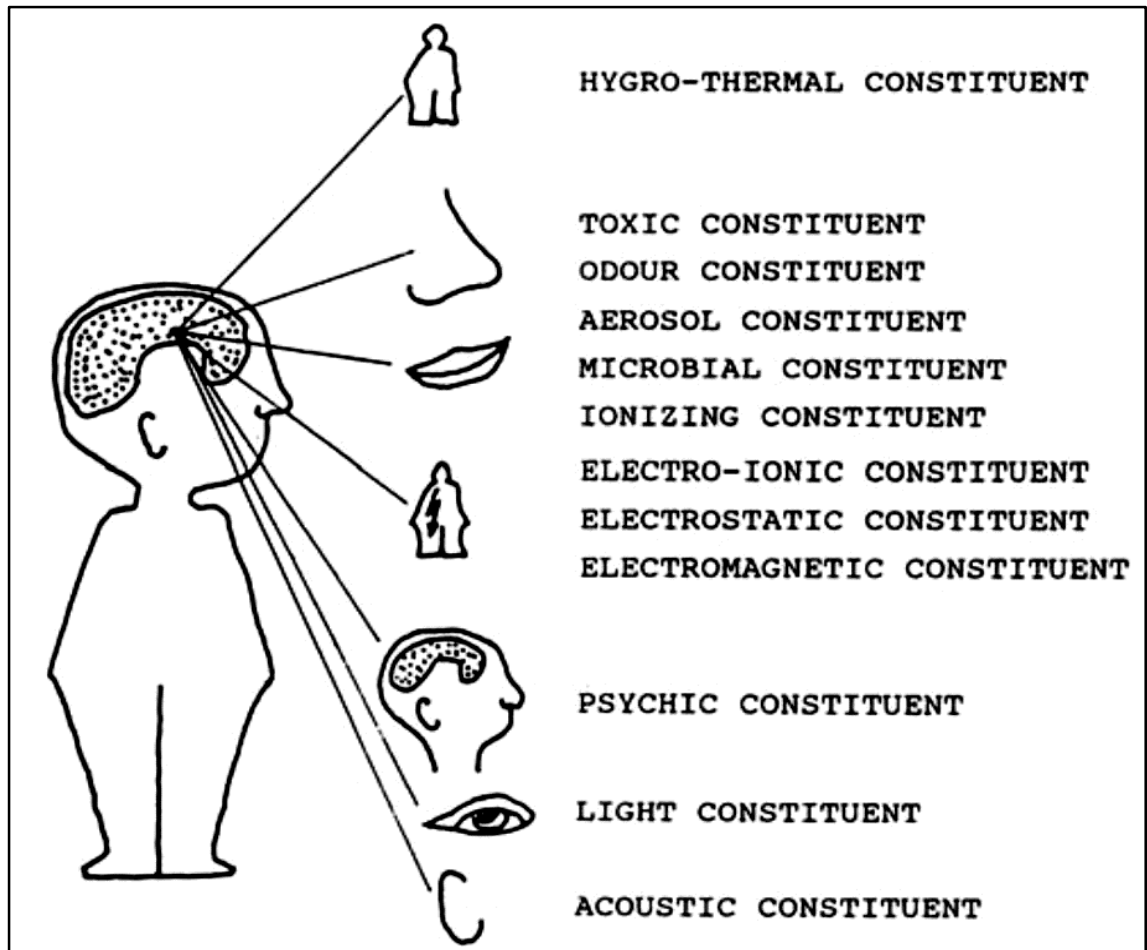
Tärkeimmät sopimusasiakirjat, joissa sisäilmastoluokitukseen voidaan viitata, ovat omistajan ja käyttäjän välinen esivuokrasopimus/ryhtymispäätös, konsulttisopimukset ja urakkasopimukset. Nämä sisäilmastoluokat ovat yleisellä tasolla olevia ohjeita ja pitävät sisällään sisätilan lämpö-, ääni- ja valaistusolosuhteiden sekä sisäilman epäpuhtauksien tavoitearvoja. Tämän lisäksi sisäilmaluokituksessa on ohjeistuksen toinen osa, Suunnittelu- ja toteutusohjeet, joka käsittelee suunnittelussa ja rakennustyömaan eri vaiheissa noudatettavia periaatteita ja menettelytapoja sekä kolmas osa, vaatimukset rakennustuotteille, jonka tarkoituksena on edistää vähäpäästöisten rakennusmateriaalien ja puhtaiden ilmanvaihtotuotteiden kehittämistä ja käyttöä. Sisäilmastoluokitus on otettu rakennuslalla laajasti käyttöön ja siitä on viime vuosilta paljon käyttökokemuksia. Se toimii ohjenuorana lähes kaikessa toimitilarakentamisessa. Siihen perustuviin rakennusmateriaalien ja ilmanvaihtotuotteiden M1-luokkiin on hyväksytty jo yli 1300 tuotetta. (Säteri 2008) Näistä rakennusmateriaalien päästöluokitusta kuvaavista M-luokista kerrotaan enemmän kohdassa 4.1.1. Tämän lisäksi Sisäilmastoluokitus 2008:ssa on asetettu tavoitearvot ilmaston puhtausluokille, sisäilman valaistus ja ääniolosuhteille sekä suunnittelun tasolle ja rakennustöiden puhtaustasolle. Näihin edellä mainittuihin tavoitearvoihin ei ole perehdytty tässä diplomityössä, paitsi ilmanvaihdon filtoerien osalta.

3.3 Huonon sisäilman aiheuttamat terveyshaitat ja muut haitta-vaikutukset

Sisäilma sisältää monimutkaisen sekoituksen eläviä ja kuolleita mikro-organismeja, toksineja, allergeeneja ja kemikaaleja. Mikrobeja, kaasumaisia orgaanisia yhdisteitä ja erikokoisia partikkeleita on kaikkialla sisä- ja ulkoilmassa. (WHO 2009)

Asunnon ja muiden oleskelutilojen kemialliset, mikrobiologiset ja fysikaaliset olosuhteet vaikuttavat tilan käyttäjien terveyteen ja viihtyvyyteen kyseessä olevissa tiloissa. Fysikaalisiin olosuhteisiin kuuluvat muun muassa sisäilman lämpötila, kosteus, melu, säteily ja valaistus. (STM 2003) Kemiallisista ja mikrobiologisista olosuhteista puhuttaessa keskitytään sisäilman haitta-aineisiin ja epäpuhtauksiin, jotka jakautuvat orgaanisiin ja epäorgaanisiin epäpuhtauksiin. Epäorgaanisiin epäpuhtauksiin kuuluu muun muassa hiilidioksidi, hiilimonoksidi, ammoniakki ja rikkiyhdisteet. Orgaanisia kaasumaisia yhdisteitä voi olla sisäilmassa satoja ja ne on jaettu omiin ryhmiin kiehumispiteidensä mukaan. Sisäilman laatu muodostuu siinä esiintyvistä epäpuhtauksista, sekä siitä kuinka ihminen aistii ilman laadun; miellyttävänä tai epämiellyttävänä (Villberg, Saarela ym. 2004).

Sisäilman vaikutukset ihmisen tuntemuksiin ja hyvinvointiin ovat moninaiset ja niiden ilmiöiden ymmärtämiseen vaaditaan tietämystä myös ihmisen kehon ja mielen toiminnasta. Ihmisen kokeman sisäilman olosuhteisiin vaikuttavat sisäilman lämpötila, kosteus, hajuhaitat ja toksisia aineita sisältävät materiaalit, aerosolit, mikrobit ja erilaiset kaasumaiset yhdisteet sekä sisätilan staattinen sähköisyys ja varautuneiden ionien taso. Kuva 3 ja taulukko 2 ilmentävät, niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat ihmisen olotilaan ja hyvinvointiin sisäilmastossa ja mitä haittavaikutuksia huonolla sisäilmasto-olosuhteilla on rakennuksen käyttäjään. (Jokl 2003)



Kuva 3. Ihmisen kokema sisäilman eri ilmiöiden aistiminen kehon tuntohermojen kautta. (Jokl 2003)

Epäpuhtaan sisäilman aiheuttamaksi tautikuormaksi on arvioitu vuosittain EU:ssa yli 2 miljoonaa ja Suomessa 13 300 menetettyä tervettä elinvuotta. Ilmanvaihdon ja ilmastuvuotojen kautta sisäilmaan pääsevien ulkoilman epäpuhtauksien osuus tautitaakasta on arvioitu olevan noin 57,5 % ja sisälähteiden noin 42,5 % (Hänninen, Asikainen 2013). Terveysvaikutuksiin johtaneita syitä ei aina tarkalleen tiedetä, jonka takia tilastoidut huonon sisäilman aiheuttamien oireiden syyt ovat osaltaan suuntaa-antavia eivätkä suinkaan kiistattomia faktoja sikäli, kun sisäilmasta aiheutuvat oireet voivat olla erittäin monen tekijän summa eikä vielä nykypäivänäkään voida yksiselitteisesti osoittaa, mitkä oireet johtuvat mistäkin tekijästä. On ymmärrettävää, ettei esimerkiksi kemiallisiin yhdisteisiin altistuminen ja siitä johtuvat mahdolliset allergiaherkkyydet ole yhtä helposti osoitettavissa, kuin asbestin aiheuttamat vakavat haittavaikutukset ihmisen terveyteen.

Taulukko 2. Sisätilojen stressitekijöiden vaikutukset ihmisen hyvinvointiin (Bluyssen 2013).

Haitan taso	Iho	Silmät	Korvat	Nenä	Hengitystiet
Viihtyvyyshaitta	Kuuma, kylmä, vedontunne, hikoilu	Liian kirkas valo, liian pimeä tila, näköhäiriö, häikäisevyys, väsyminen	Häiritsevä melu, puheen kuuluvuuden ja ymmärtämisen heikkeneminen	Haju, ärsytys	Yskä, hengitysvaikeudet
Allergia- ja ärsytysoireet	Ärsytysihottuma: kuiva, kutiseva, punoittava iho	Punoittavat, väsyneet, kutisevat ja kuivat silmät		Vuotava tai tukkoinen nenä, aivastelu	Hengityksen vinkuminen, astma,
Infektiosairaudet	Infektiot: bakteeri-, virus- ja sienisairaus	Kuivasilmäisyys-oireyhtymä (harvinainen)	Sisäkorvan tulehdus	Vuotava tai tukkoinen nenä ja väliaikainen hajuaistin menetys	Infektiot: keuhkoputkentulehdus, bakteeri-, virus- ja sienisairaus
Toksisten vaikutusten aiheuttamat krooniset oireet	Säteilyyn liittyvät ihosairaudet (palovammat ym.)	UV-säteilyn aiheuttama silmien vauriot, harmaakaihi (infrapunavallo)	Vakava ja pysyvä kuulon aleneminen	Pysyvä hajuaistin menetys	Hengitysteiden vauriot, syöpä

Nykypäivänä useat tutkimukset ovat osoittaneet, että sisäilmaston olosuhteet vaikuttavat merkittävästi rakennuksen käyttäjän terveyden, mielentilan ja hyvinvoinnin lisäksi myös työn tuottavuuteen (Chiang, Lai 2002, Simon, Butala 2004, Olesen 2007). Chiang ja Lai (2002) mainitsivat sisäilmaston olosuhteiden olevan tärkeimpiä tekijöitä tarkasteltaessa toimiston sisäilmasta aiheutuvan työtehokkuuden tason taloudellisia vaikutuksia erilaisissa sisäilmastoissa (Chiang, Lai 2002). Huono sisäilmaston laatu voi vaikuttaa negatiivisesti muun muassa työyhteisön ja organisaation kannattavuuteen sekä aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia työntekijöiden sairastumisista, poissaoloista ja tehottomuudesta johtuen (Wong, Mui ym. 2008). Sitä vastoin hyvä sisäilmasto saattaa edesauttaa työtehokkuutta vähentämällä sairaudesta johtuvia poissaoloja ja lisäämällä työntekijöiden hyvinvointia ja tehokkuutta. Ratcliffe ja Day (2003) arvioivat tutkimustyössään sairauspoissaolojen ja hengitystiesairauksien vähenevän noin 20 % muuttamalla hieman ilmanvaihtokerrointa toimistohuoneissa (Ratcliffe, Day 2003). Lisäksi heidän tutkimuksessa selvisi, että työntekijöiden stressinsietokyky parani merkittävästi työpaikan sisäilmasto-olosuhteita muuttamalla ja jopa 41 % työntekijöistä pitivät työolosuhteita tärkeimpinä tekijöinä hyvän työtehokkuuden saavuttamiseksi (Ratcliffe, Day 2003).

3.3.1 Sairasrakennusoireet

1970-luvun loppupuolella määriteltiin ilmiö nimeltä sairas rakennus -oireyhtymä (SBS; sick building syndrome), jota käytetään kuvaamaan joukkoa erilaisia rakennuksessa koettuja oireita. Oleellista näille oireille on se, että ne poistuvat tai helpottuvat rakennuksesta poistuttaessa. WHO:n määrittelyn mukaan tähän oireyhtymään liitetään usein seuraavat oireet: 1) limakalvo-oireet 2) iho- ja silmäoireet 3) hengenahdistus 4) väsymys 5) päänsärky, 6) pahoinvointi, 7) uneliaisuus, 8) keskittymiskyvyn puute, 9) hajuhaitat ja 10) influenssa-oireet. Herkkyys sisäilman epäpuhtauksille vaihtelee yksilökohtaisesti. Toiset eivät huomaa erityisiä reaktioita, kun taas herkemmat yksilöt vastaavassa tilassa aivastelevat ja tuntevat esimerkiksi nenän kuivumista. (Villberg, Saarela ym. 2004) Ihmiset hakeutuvat lääkäriin fyysisten oireiden vaivatessa tai kroonistuessa, mutta astmaa ja muutamaa harvinaisempaa sairautta sairastavia lukuun ottamatta terveydenhuoltojärjestelmä ei useinkaan tunnista eikä tunnusta sisäilmasta sairastunutta (Mansukoski 2013). Tästä johtuen olisi erittäin tärkeää kehittää myös terveydenhuollon ja sisäilmaongelmien tutkimisen yhteistyötä entisestään. Näin voitaisiin helpommin tunnistaa sisäilmaongelmiin liittyvä oireilu ja nopeuttaa ongelmien havaitsemista.

Silmien ja hengitysteiden ärsytysoireet, hajuhaitat sekä muut klassiset sairasrakennusoireet ovat tärkeitä tekijöitä ei-teollisten rakennusten sisäilman laatua arvioitaessa. Nämä ovat yleisimpiä oireita sisäilmaongelmaisten rakennusten käyttäjien valituksissa. Kyseiset oireet korreloivat toinen toistaan, mikä tekee yksittäisen oireen ja haittavaikutuksen

syyn yhdistämisestä hankalaa, ellei jopa mahdotonta joissain tapauksissa. Tämän lisäksi oireiden tulkinnassa ja subjektiivisessa asioiden kokemisessa sekä terminologiassa voi olla merkittäviä eroja ihmisten ja kansakuntien välillä. (Wolkoff, Wilkins ym. 2006)

Yleisimpinä tekijöinä sairusrakennusoireiden aiheuttajina sisäilman epäpuhtauspäästöjen osalta ovat mikrobiologisten prosessien ja rakennusmateriaalien aiheuttamien kaasumaisien yhdisteiden emissiot, sekä formaldehydin korkeat arvot sisäympäristössä. Uudisrakennuksissa ja juuri remontoituissa rakennuksissa, missä ei ole käytetty sisäilmanlaadun kannalta sopivia rakennusmateriaaleja tai rakennussuunnittelun taso ei ole korkea, saattaa hajuhaitat, sekä korkeat VOC:n ja formaldehydin pitoisuudet aiheuttavat rakennuksen käyttäjälle ongelmia, jotka heikentävät hyvinvointia ja useissa tapauksissa vaarantavat myös terveyttä. (Yu, Kim 2010) Lisäksi sairusrakennusoireiden on todettu useissa tutkimuksissa olevan yhteydessä myös korkeaan huonelämpötilaan, pölyiseen huoneeseen sekä alhaiseen ilmanvaihdon tehoon tai heikkoon ilmastoinnin tasoon (Seppänen 2004).

3.4 Sisäilman lämpötila ja terminen viihtyvyys

Ilman lämpötila on eräs keskeisimmistä tekijöistä sisäilmassa koetun viihtyvyyden kannalta. Poikkeamat toivotuista sisälämpötiloista nähdään helposti lisääntyneinä valituksina, terveydellisenä haittana ja työn tuottavuuden laskuna. (Seppänen 2004) Ihmisen kokemaan lämpöaistimukseen vaikuttavat huoneilman lämpötila, lämpösäteily, ilman virtausnopeus, ilman kosteussisältö, ihmisen vaatetus ja toiminnan laatu (STM 2003). Ihmisen kokema lämpöaistimus on yksilöllistä ja toiset kokevat samat olosuhteet erilaisina. Sisälämpötila on yksi tärkeimmistä sisäympäristön ominaisuuksista. Termisillä olosuhteilla tiedetään olevan vaikutuksia rakennuksen käyttäjän mukavuuteen, koettuun ilmanlaatuun, sairas rakennus-oireyhtymän oireisiin, suorituskykyyn, työntekijöiden tuottavuuteen ja unen laatuun (Salonen, Lappalainen ym. 2011b, Seppänen, Fisk ym. 2004, Salonen, Lappalainen ym. 2011a). Suomessa lämpöoloihin kohdistuvat valitukset ovat useimmiten koskeneet matalia sisälämpötiloja, kylmiä pintoja ja vetoa (Kauppinen, Kovanen ym. 2006). Matalat pintalämpötilat voivat johtua kylmäsilloista, eristeiden asennuksen puutteista tai -virheistä ja ilmavuvodoista ja vedontunne johtuu kylmien pintojen ja ulkovaipan vuotokohtien aiheuttamasta ilman virtauksesta ja pintalämpötilaeroista (Kauppinen, Kovanen ym. 2006). Matalan lämpötilan aiheuttamia viihtyvyyshaittoja vastaan voi kuitenkin vaikuttaa paremmin kuin korkean lämpötilan aiheuttamiin haittoihin esimerkiksi pukeutumisen avulla.

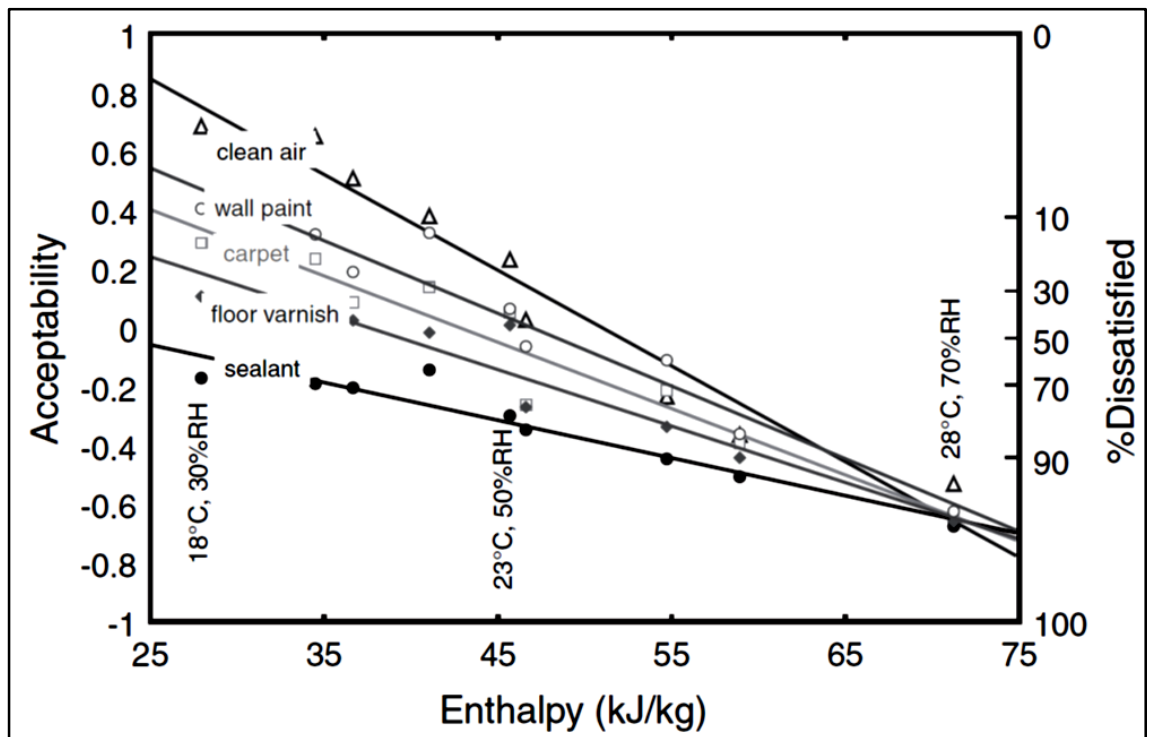
Useat tutkimukset osoittavat lämpötilan ja kosteuden vaikuttavan tuntuvasti ihmisten ilmanlaadun kokemiseen jo lyhytaikaisessa altistumisessa. Fang ym. (2004) tutkivat toimiston sisäilman lämpötilan ja kosteuden vaikutuksia sisäilman laadun kannalta ja tuloksesta löydettiin yhteys ihmisten kokeman ilman miellyttävyyden ja huoneilman entalpian välille (Fang, Wyon ym. 2004). Entalpia on ilman tilafunktio, johon vaikuttavat ilman lämpötila, sekä ilman sisältämän vesihöyryn määrä ja tässä entalpiaa käytetään kuvaamaan ilman lämpösisältöä. Fang ym. (1998) huomasivat tutkimuksissaan sisäilman entalpian arvon vaikuttavan lähes lineaarisesti korreloivana ihmisten tyytyväisyyteen ilman laatua kohtaan (Fang 1998). Kyseisessä tutkimuksessa huomattiin, että sisäilman entalpian kasvaessa arvosta 25 J/kgK tutkimushenkilöiden tyytymättömien osuus kasvoi kaikissa suoritetuissa kokeissa. Kuvassa 4 on nähtävissä tulokset viidestä eri koesarjasta, jossa sisäilman lämpötilaa ja kosteutta sekä näin ollen entalpiaa lisättiin tutkittavassa tilassa, kun jokaisessa viidessä koesarjassa sisäilman entalpian ja epäpuhtauksien yhteisvaikutusta tutkittiin. Näissä kokeissa johtopäätöksenä voitiin todeta, että sisäilman ollessa puhdasta, kuivaa, ja viileää, koehenkilöt kokivat ilman miellyttäväksi. Sen sijaan korke-

ammilla kosteuspitoisuuksilla ja lämpötilan arvoilla myös puhdas ilma alkoi tuntua koehenkilöiden mielestä epämiellyttävältä. Edellä mainitussa tutkimuksessa koehenkilöillä oli kuitenkin mahdollisuus itse määrätä pukeutumistaan koestuksen aikana, mikä suosi alhaisempia entalpian tasoja, johtuen vaatteiden lämmöneristyskyvystä alhaisemmillä lämpötiloilla. Sisäilman entalpia voidaan laskea kaavalla 1, kun tunnetaan ilman kosteussisältö ja lämpötila (Lampinen, El Haj Assad ym. 2009):

$$h_k = 1,006t + x(2501 + 1,85t) \quad (1)$$

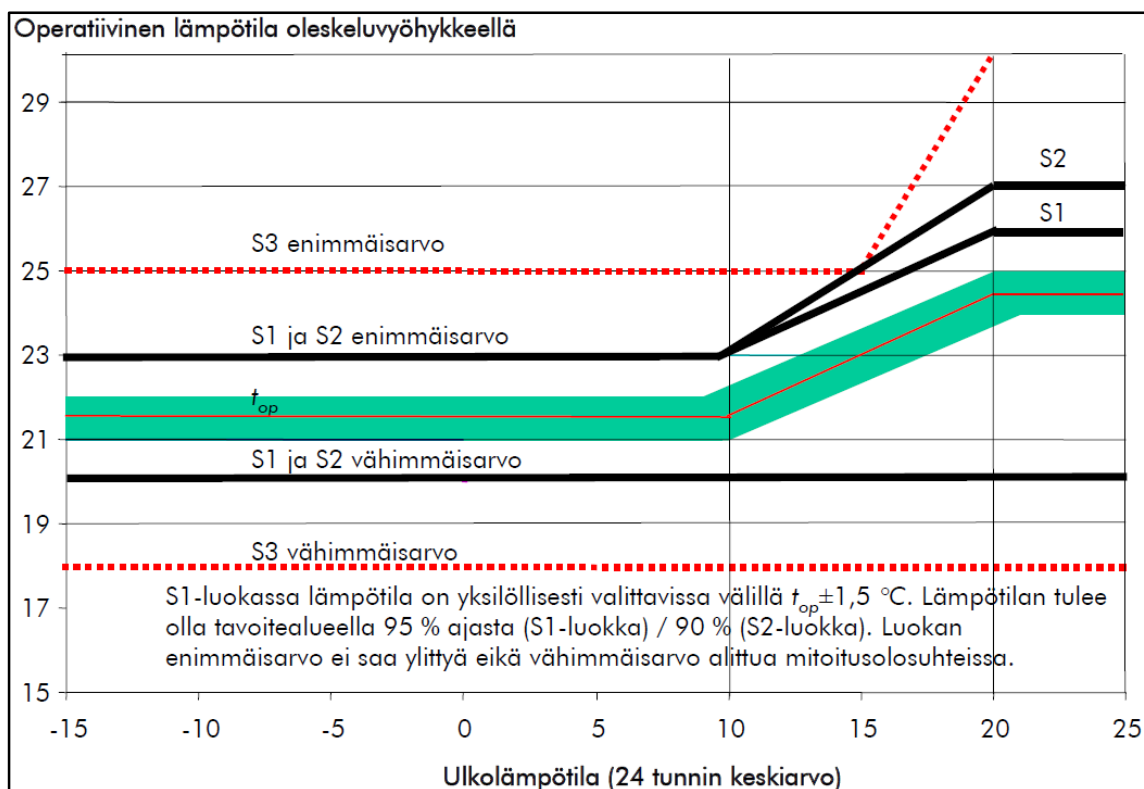
t on lämpötila [°C]

x on vesihöyryn määrä kuivaa ilmakiloa kohden [kg_{H2O}/kg_{k.i.}]



Kuva 4. Sisäilman entalpian merkitys tyytymättömien osuudessa

Sisäilmastoluokituksissa on annettu ohjeet sisäilman lämpötilalle eri ulkolämpötilojen vallitessa. Lämpötilojen osalta tavoitetasot esitetään Sisäilmastoluokitus 2008:ssa kesä- ja talvikausien lisäksi myös välikaudelle, jolloin ulkolämpötila on 0...20 °C. S1- ja S2-luokkien lämpötilan tavoitetasot ovat lähes samat, mutta S1-luokassa lämpötilan tulee olla yksilöllisesti säädettävissä ja pysyä S2-luokkaa paremmin tavoitearvojen sisällä. S2-luokassa on kesällä hieman korkeampi lämpötilan yläraja, jolloin voidaan pärjätä ilman koneellista jäähdytystä. Kuvassa 5 on esitetty piirros kyseisistä lämpötilan tavoitearvoista.



Kuva 5. Lämpötilan tavoitearvot Sisäilmastoluokitus 2008:ssa. Lämpötilan tavoitealue S1-luokassa on esitetty tummennettuna. Alueen keskellä oleva viiva (T_{op}) on lämpötilan asetusarvo (Säteri 2008).

3.4.1 Termisen viihtyvyyden laskennallinen arviointi

Yksi tärkeimmistä sisäilman suunnittelun tavoitteista on tarjota rakennuksen käyttäjälle hyvät lämpöolosuhteet, jotka koostuvat ilman lämpötilasta, vertikaalisesta lämpötilan muutoksesta, ilman liikkeen nopeudesta, ilman kosteudesta, ympäröivien pintojen lämpötilasta sekä rakennuksen käyttäjän vaatetuksesta ja aktiivisuudesta (Olesen 2007, SFS-EN ISO 7730 2006b). Standardissa SFS-EN ISO 7730 (2006) ehdotetaan sisäilman termisten olosuhteiden mittaamiselle ja arvioimiselle PMV-PPD- indeksejä, joiden avulla voidaan määrittää sisäilmaston lämpöolosuhteiden vaikutuksia rakennuksen käyttäjän hyvinvointiin ja termiseen viihtyvyyteen.

Tämän diplomityön kenttätutkimuksien tulosten tarkastelussa käytettiin hyväksi standardissa SFS-EN ISO 7730 esitettyä tapaa määrittää mittausdatan perusteella termisen viihtyvyyden tasoa tutkittavassa kohteessa. Kyseisessä standardissa esitetään PMV-indeksin määräytyvän seitsenportaisen asteikon mukaan. Asteikossa oleva arvo määräytyy sen mukaan, miten suuren ihmisjoukon kokemukset ovat osoittaneet termisen tuntemuksen jakautuvan sisäilman termisen viihtyvyyden kyselytutkimuksissa ja sitä myötä kehitettyjen ihmiskehon lämpötasapainotilan laskentamenetelmien avulla. Laskentamenetelmissä ja seitsenportaisessa arvotaulukossa on ihmiskehon termiselle tasapainolle asetettu nolla-arvoksi sellainen keskiarvo, jossa ihmiskeho ja ympäristö saavuttavat lämpötasapainon tilanteessa, jossa ihmisen keho ei joudu tekemään liiaksi työtä kehon viilentämiseksi tai kehon sisäisen lämpötilan säilyttämiseksi (Fanger 1970). Tämä nolla-arvoa kutsutaan neutraaliksi ja siitä poikkeavat lukemat koetaan tilastollisesti epämiellyttävämpinä. Taulukossa 3 on esitetty tämä seitsenportainen arvoasteikko (PMV=predicted mean value), jossa 0 arvon saa miellyttävimmät lämpöolosuhteet ja mitä enemmän nolasta poiketaan, suuntaan tai toiseen, sitä epämiellyttävämpänä ilma koetaan.

Taulukko 3. Termisen viihtyvyyden tunteen seitsemäportainen arvoasteikko

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
Kuuma	Lämmin	Hieman lämmin	Neutraali	Hieman viileä	Viileä	Kylmä

Yllä olevan taulukon 3 arvot saadaan laskettu kaavoilla 2...5 (SFS-EN ISO 7730 2006b):

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a) - 0,42 \cdot ((M - W) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)] \quad (2)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot [3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4) + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)] \quad (3)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{kun } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{kun } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot l_{cl} & \text{kun } l_{cl} \leq 0,078 \, m^2 \cdot K/W \\ 1,05 + 0,645 \cdot l_{cl} & \text{kun } l_{cl} > 0,078 \, m^2 \cdot K/W \end{cases} \quad (5)$$

missä

M on metabolinen ekvivalentti [W/m²]

W on tehollinen ulkoinen lämmönsiirto [W/m²]

I_{cl} on vaatetuksesta aiheutuva lämmöneristys [m²K/W]

f_{cl} on vaatetuksen pinta-alasta aiheutuva kerroin

t_a on vallitseva ilman lämpötila [°C]

\bar{t}_r on keskimääräinen pintojen säteilylämpötila [°C]

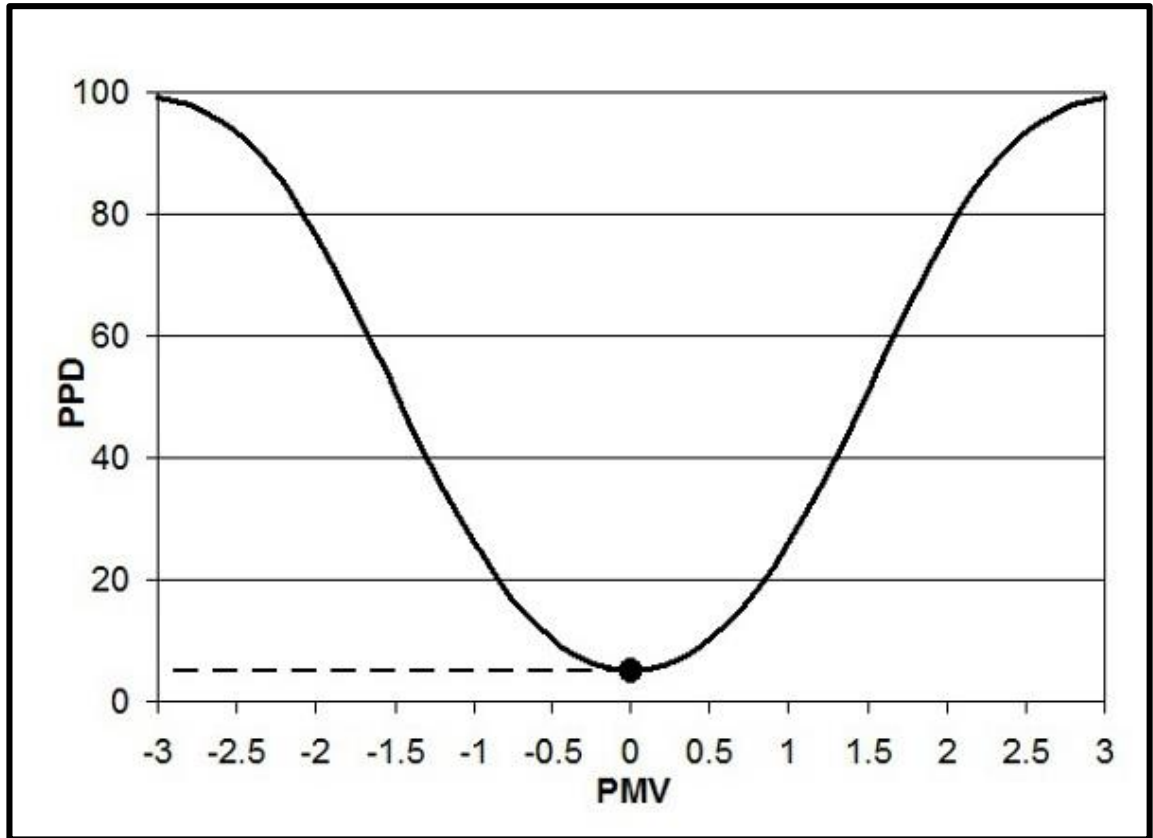
v_{ar} on ilman nopeus [m/s]

p_a on ilman sisältämän vesihöyryn osapaine [Pa]

h_c on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m²K)]

t_{cl} on vaatetuksen pinnan lämpötila [°C]

Kaavoista 2...6 saaduista tuloksista voidaan arvioida tutkittavan sisäilman termisten olosuhteiden aikaansaama oletettujen tyytymättömien henkilöiden prosentuaalinen osuus kyseisissä olosuhteissa. Kuvassa 6 on havainnollistettu, kuinka laskennallisesti saavutettu PMV-luku vaikuttaa oletusarvoisesti tyytymättömien osuuteen (PPD).



Kuva 6. Termisen viihtyvyyden arvoasteikon ja koetun tyytyväisyyden välinen yhteys (SFS-EN ISO 7730 2006).

Kaavojen 5 ja 6 avulla voidaan laskea PPD-arvo, kun sitä ennen on määritettynä PMV (SFS-EN ISO 7730 2006b):

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (6)$$

Tarkasteltaessa kaavaa 6 ja kuvaa 6 huomataan, että oletettujen tyytymättömien osuus on aina vähintään 5 %, vaikka laskentatarkastelussa PMV:n arvo olisi 0. Ihmiset kokevat ja aistivat ympäristöään yksilöllisesti, mistä johtuen osa ihmisistä on tyytymättömiä myös optimilämpöolosuhteiden vallitessa.

Termisen viihtyvyyden laskukaavoissa esiintyvä I_{cl} -arvo saadaan taulukossa 4 esitettyjen vaatekokonaisuuksien lämmöneristysominaisuuksista, jossa usein käytetty arvo toimistotyöntekijälle on 1,0 clo. Lisäksi kaavassa esiintyvä M , metabolinen ekvivalentti tulee määrittää standardissa esitetyllä tavalla ja tämän tutkimuksen yhteydessä kiinnitetään huomiota toimistotyöntekijän olosuhteisiin, mikä tarkoittaa, että tyypillinen M -luku vastaisi parametreja 1,2 met ja 70 W/m². Edellä mainittu W on normaalisti 0, \bar{t}_r arvioidaan sisä- ja ulkolämpötilan perusteella ja t_{cl} saadaan iteroimalla. Lisäksi p_a :lle pätee kaavat 7 ja 8 (Lampinen, El Haj Assad ym. 2009):

$$p_a = RH \cdot p'_h(t_a) \quad (7)$$

$$\log \frac{p'_h(t_a)}{3142,31} = 28,59051 - 8,2 \log(t_a + 273,16) + 0,0024804(t_a + 273,16) \quad (8)$$

$$- \frac{1}{t_a + 273,16}$$

Taulukko 4. Tyypillisten vaateyhdistelmien lämmöneristävyys ja clo-arvot (SFS-EN ISO 7730 2006).

Työvaatetus	I _d		Arkivaatetus	I _d	
	clo	m ² ·K/W		clo	m ² ·K/W
Kevyet alusvaatteet, haalarit, sukat, kengät	0,7	0,110	Alushousut, T-paita, shortsit, kevyet sukat, sandaalit	0,30	0,050
Kevyet alusvaatteet, paita, haalarit, sukat, kengät	0,8	0,125	Alusvaatteet, lyhytaihainen paita, kevyet housut, kevyet sukat, kengät	0,50	0,080
Kevyet alusvaatteet, paita, housut, smokki, sukat, kengät	0,9	0,140	Alushousut, alushame, sukkahousut, mekko, kengät	0,70	0,105
Lyhytaihaiset ja -lahkeiset alusvaatteet, paita, housut, pikkutakki, sukat, kengät	1,0	0,155	Alusvaatteet, paita, housut, kevyet sukat, kengät	0,70	0,110
Pitkäaihaiset ja -lahkeiset alusvaatteet, housut, paksu pusero, sukat, kengät	1,2	0,185	Alushousut, paita, housut, pikkutakki, sukat, kengät	1,00	0,155
Lyhytaihaiset ja -lahkeiset alusvaatteet, paita, housut, pikkutakki, päällystakki, sukat, kengät	1,4	0,220	Alushousut, sukkahousut, paitapusero, pitkä hame, päällystakki, kengät	1,10	0,170
Lyhytaihaiset ja -lahkeiset alusvaatteet, paita, paksut housut, pikkutakki, paksu päällystakki, sukat, kengät, päähine, hansikkaat	2,0	0,310	Pitkäaihaiset ja -lahkeiset alusvaatteet, paita, housut, V-aukkoinen pusero, päällystakki, sukat, kengät	1,30	0,200
Pitkäaihaiset ja -lahkeiset alusvaatteet, paksu pusero, paksut housut, paksu anorakki, paksu päällystakki, sukat, kengät, päähine, hansikkaat	2,55	0,395	Lyhytaihaiset ja -lahkeiset alusvaatteet, paita, housut, liivi, pikkutakki, päällystakki, sukat, kengät	1,50	0,230

Standardissa SFS-EN ISO 7730 on myös esitetty sisäilman termisten olosuhteiden laadulle kolme kategoriala A, B ja C, joista A on paras luokka ja C heikoin. Taulukossa 5 on eri luokkiin vaaditut olosuhteet.

Taulukko 5. Laadulliset kategoriat sisäilman termisille olosuhteille (SFS-EN ISO 7730 2006).

Kategoria	Koko kehon termisen tilan tarkastelu		Kehon paikallisen termisen epämukavuuden tarkastelu			
	PPD %	PMV	DR %	PD % aiheuttava tekijä		
				Vertikaalinen lämpötilaero	Liian lämmin tai liian kylmä lattia	Epäsymmetrinen lämpösäteily
A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

3.5 Sisäilman epäpuhtaudet

Rakennusten sisäilmaongelmat ovat yleisiä ja niitä aiheuttavat kosteus ja homevaurioiden lisäksi myös monet muut tekijät. Näitä ovat mm. kuiva huoneilma, tunkkaisuus, pölyt, tupakansavu ja teolliset kuidut. (Reijula, Ahonen ym. 2012) Rakennusteknisestä näkökulmasta epäpuhtauksien kertyminen sisäilmaan voi olla monen tekijän summa, kuten liian pieni ilmanvaihto, korvausilman hallitsematon sisäänvalo rakenteiden läpi, rakenteelliset viat ja materiaalivalinnat, kosteustekninen toimimattomuus tai liian suuri sisäpuolinen haitta-aineen emissio. Ongelmaan johtaneiden syiden mahdolliset variaatiot ovat niin moninaiset, että kukin ongelmatilanne on tutkittava erikseen ja huolellisesti.

Pahimmillaan sisäilman kemialliset yhdisteet saattavat olla terveydelle haitallisia tai vaarallisia, jolloin ne altistusajan pituudesta riippuen voivat johtaa pysyvään sairastumiseen tai ohimenevään oireiluun. Oireilu monesti uusiutuu heti kun henkilö altistuu uudelleen herkistymisen aiheuttaneille yhdisteille. (Villberg, Saarela ym. 2004) Joidenkin haitta-ainneiden osalta on riskinä myös ennen aikainen kuolema tai vakava sairastuminen.

3.5.1 Kaasumaiset orgaaniset yhdisteet

Sisäilmassa esiintyy lukuisia kaasumaisia ja hiukkasiin sitoutuneita orgaanisia yhdisteitä, jotka WHO:n mukaan ryhmitellään kiehumapisteensä mukaisesti neljään ryhmään. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat erittäin haihtuvat orgaaniset yhdisteet, joiden kiehumispisteet ovat välillä 0 ja 100 °C. Toiseen ryhmään kuuluvat haihtuvat orgaaniset yhdisteet, joiden kiehumispisteet ovat noin 50 – 260 °C. Kolmanteen ryhmään kuuluvat puoli haihtuvat orgaaniset yhdisteet, joiden kiehumispisteet löytyvät väliltä 240 – 400 °C ja neljännessä ryhmässä esiintyy hiukkasiin sitoutuneet yhdisteet, joiden kiehumispisteet ovat yli 380 °C. Taulukosta 6 nähdään eri kategorioihin kuuluvat yhdisteet, sekä niihin liittyvät ominaisuudet. (Berglund, Clausen ym. 1997)

Taulukko 6. Sisäilman orgaanisten epäpuhtauksien jaottelu (Berglund, Clausen ym. 1997)

Kategoria	Selite	Lyhenne	Kiehumispisteen lämpötila-alue	Näytteenoton kenttäkokeissa tyypillisesti käytetty menetelmä
1	Helposti haihtuvat (kaasumaiset) orgaaniset yhdisteet	VVOC	0...50-100 C°	Aktiivihiilipohjainen adsorbentti, hiilipohjainen molekyyliseula
2	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	VOC	50-100...240-260 C°	Adsorbentit: Tenax, kimkööri-, puuhiilipohjainen
3	Puoli haihtuvat orgaaniset yhdisteet	SVOC	240-260...380-400 C°	XAD-adsorbentti, polyuretaanivahto-adsorbentti
4	Hiukkasiin sitoutuneet yhdisteet tai orgaaniset yhdisteet	POM	> 380 C°	Näytteenkeruu filtereillä

Sisäilmaolosuhteissa VOC-yhdisteet ovat joko kaasumaisessa tai höyrymäisessä muodossa, mutta vähemmän haihtuvat yhdisteet voivat esiintyä myös hiukkasmuodossa tai partikkeleihin adsorboituneina. Tavanomaisimpia VOC-yhdisteitä ovat alkaanit, terpeenit, aromaattiset hiilivedyt, halogenoidut yhdisteet, aldehydit, ketonit, alkoholit ja esterit (Rundt, Backlund ym. 2005). Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että sisäilmasta mitattujen kohonneiden VOC- ja formaldehydipitoisuuksien syynä ovat rakennusmateriaalit. Kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden, kuten SVOCien, aromaattisten hiilivetyjen ja aldehydien sekä formaldehydin kohonneiden pitoisuuksien tiedetään aiheuttavan ihmiselle joissain tapauksissa allergisia oireita, hajuhaittoja, päänsärkyä, uneliaisuutta, pahoinvointia, hermostuneisuutta, iho-oireita, kurkkukipua, limakalvojen haavautumista sekä silmien ja hengitysteiden ärsytysoireita ja formaldehydin tapauksessa myös ennen aikaisen kuoleman riskiä (Yu, Kim 2010).

Erittäin usein sisäilman orgaanisiin yhdisteisiin liitetty haitta on haju, joka on yleensä ennen kaikkea viihtyvyshaitta. Terveyshaitaksi se muodostuu silloin kun sen aiheuttavat haitalliseksi tunnetut yhdisteet. Yleensä kemikaalien hajukynnykset ovat huomattavasti

matalampia kuin ärsytystä aiheuttavat pitoisuudet, mutta reaktiivisilla yhdisteillä, kuten formaldehydillä, hajukynnyksen antama "turvallisuusmarginaali" voi olla yllättävän kapea (Järnström, Saarela 2005). Formaldehydi on todettu pistävän hajunsa lisäksi syöpää aiheuttavaksi aineeksi. Yksilölliset vaihtelut hajuaistimuksessa ovat suuria, lisäksi mm. kulttuurierot, hajuihin liittyvät aikaisemmat miellehtymät ja adaptaatio vaikuttavat hajuun aistimiseen. Sisäilman hajuhaittojen selvittämisessä voidaan käyttää VOC-määrittäjiä ja tarvittaessa aistinvaraiseen arviointiin koulutettua hajupaneelia. (Rundt, Backlund ym. 2005)

Teollisuudessa käytetään eräitä SVOC-yhdisteitä materiaaleissa muun muassa pehmentiminä, palonestoaineina ja lahonestoaineina sekä muissa merkityksissä parantamaan materiaalin ominaisuuksia. Jokapäiväisessä käytössä olevista materiaaleista, jotka sisältävät SVOC:ja, voidaan nimetä esimerkiksi muovimatot, tapetit, sähköeristykset, elintarvikkeiden pakkausmateriaalit, lelut, kaapelit, televisiot, tekstiilit, huonekalut ja eristävät vaahdot. Monet tutkimukset ovat varoittaneet sisäilman kohonneiden SVOC-yhdisteiden pitoisuuksien olevan vaaraksi lasten, imeväisten ja sikiöiden kehitykselle. Ne voivat häiritä kehittymättömän yksilön kehon kudoksia ja hormonitoimintaa ja aiheuttaa jopa pysyviä rakenteellisia muutoksia kudoksissa ja hormonaalisessa toiminnassa. Useissa tutkimuksissa on osoitettu muun muassa flataattien aiheuttavan miespuolisille henkilöille hedelmällisyyden heikentymistä ja arvioiden mukaan sillä on vaikutuksia jopa keskivartalolihavuuteen, insuliiniresistenssiin ja käyttäytymishäiriöihin. (Liu, Ye ym. 2013)

Lisäksi sisäilman mikrobien tuottamat aineenvaihduntatuotteet saattavat nostaa kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden tasoa. Mikrobien tuottamilla haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä (MVOC) tarkoitetaan kaasumaisia epäpuhtauksia, joita mikrobit (sienet ja bakteerit) muodostavat aineenvaihdunnassaan kasvunsa aikana. Kemialliselta koostumukseltaan nämä yhdisteet ovat erilaisia alkoholeja, ketoneja, terpeenejä, estereitä, aldehydejä, hiilivetyjä, laktoneja, eettereitä, happoja sekä rikki- ja typpiyhdisteitä. Mikrobien on todettu tuottavan satoja erilaisia yhdisteitä ja näiden yhdisteiden ominaisuuksiin vaikuttaa esimerkiksi niiden kasvualusta, kosteus- ja lämpöolosuhteet sekä kasvun vaihe. Useissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että mikrobien aiheuttama kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden kuormitus sisäilmaan on hyvin vähäistä verrattuna yhdisteiden kokonaiskuormaan sisäilmassa. Tästä syystä mikrobista haihtuvien aineenvaihduntatuotteiden määrittäminen sisäilmasta ei ole luotettava menetelmä tunnistaa, varmistaa tai pois sulkea rakenteissa mahdollisesti olevaa mikrobikasvustoa. (Salonen, Lappalainen ym. 2011a)

Sisäilmassa esiintyvien kaasumaisten yhdisteiden alkuperää on erittäin haastavaa määrittää johtuen useiden variaatioiden mahdollisuuksista. Esimerkiksi aromaattiset yhdisteet, jotka esiintyvät usein sisäilman mittauksissa, voivat olla peräisin palamisreaktioista, kuten tupakoinnista, lämmityksestä, moottoriajoneuvosta, rakennusmateriaaleista ja sisustuksesta, kodinkoneista tai muista kuluttajan arkipäiväisistä tuotteista. Lisäksi yhdisteet ovat voineet reagoida matkan varrella kulkeutuessaan kohti sisäilmaa esimerkiksi ulkoilman otsonin tai joidenkin rakenteissa olevien yhdisteiden kanssa.

3.5.1.1 VOC ja TVOC

Kansainvälisesti tunnistettu termi volatile organic compounds, VOC, jonka suomenkielinen vastine on haihtuvat orgaaniset yhdisteet, on tullut monille tutuksi puhuttaessa sisäilman haitallisista aineista. VOC:ejä esiintyy aina sekä sisä- että ulkoilmassa, mutta laajalti lisääntyneet uudet tuotteet ja materiaalit ovat aikaansaaneet erityisesti VOC-emissioiden lisääntymistä sisäolosuhteissa lähivuosisikymmenten aikana (Brown, Sim ym. 1994). Yli

1000 haihtuvaa orgaanista yhdistettä on tunnistettu erinäisissä sisäilmaa koskevissa ko-keissa ja yleisesti voidaan sanoa, että VOC-pitoisuudet ovat sisällä korkeammat kuin ul-kona (Salonen, Lappalainen ym. 2011a). Haihtuviksi orgaanisiksi yhdisteiksi eli VO-Ceiksi (Volatile Organic Compounds) nimitetään niitä, joiden kiehumapiste on 50–260°C välillä normaalin ilmapaineen vallitessa (WHO 1989). Haihtuvien orgaanisten yhdistei-den kokonaismäärä väliltä heksaani-heksadekaani (C6-C16), kuvaa termi TVOC (Total Volatile Organic Compounds).

TVOC-mittausten käyttökelpoisuutta on yhä enemmän alettu kyseenalaistaa käsitteiden ja määritysten erilaisista tulkinnoista, sekä puutteellisesta standardoinnista johtuen. Li-säksi yksittäisten VOC-yhdisteiden terveysvaikutukset ovat hyvin erilaisia. Siten jonkin erittäin haitallisen aineen pieni pitoisuus TVOC-määrittelyssä saattaa tulla aliarvioi-duksi, ja toisaalta vähemmän haitallisten aineiden merkitys voi liiaksi korostua. Näin ol-len kansainvälisiä tai kotimaisia viranomaisohjeita tai standardeja ei ole käytettävissä vaan olemassa olevat raja-arvot ovat ohjeellisia. TVOC-mittaustulosta ei voida siis sel-laisenaan käyttää terveyshaittojen arvioinnissa, mutta kohonnut TVOC-pitoisuus (yli 600 µg/m³) on osoitus kemiallisten aineiden epätavallisen suuresta määrästä sisäilmassa, ja edellyttää usein lisäselvityksiä. (Rundt, Backlund ym. 2005, Järnström, Saarela 2005, STM 2003)

Wolkoff ym (2006) ehdottivat, että kaasumaiset orgaaniset yhdisteet jaettaisiin neljään kategoriaan: (i) kemiallisesti reagoimattomat yhdisteet, (ii) kemiallisesti reagoivat yhdis-teet, (iii) biologisesti reagoivat yhdisteet eli sellaiset, jotka pystyvät muodostamaan uusia kemiallisia sidoksia ihmisten limakalvoissa ja (iv) toksiset yhdisteet. Näistä eri kategori-oihin jaetuista yhdisteistä, kemiallisesti reagoimattomien yhdisteiden ei ole todettu ai-heuttavan ärsytysoireita tyypillisessä sisäilmassa. (Wolkoff, Wilkins ym. 2006)

VOC:n lähteiden ollessa pääosin sisätiloissa ja sisustusmateriaaleissa, on ulkoilman kon-sentraatio lähes poikkeuksetta alhaisempi kuin sisäilmassa. Sisäilmasta detektoitujen ai-neiden osalta tärkeimmät VOC-lähteet ovat seuraavat (Salonen, Pasanen ym. 2009):

1. rakennus- ja sisustusmateriaalit sekä kodinkoneet
2. ihmiset ja ihmisten toiminta, kuten siivous, ruuanlaitto, kopiokoneiden käyttö sekä rakennuksen kunnostus ja korjaustoimenpiteet
3. ulkoilman lähteet, kuten lähellä tapahtuva vilkas moottoriajoneuvojen käyttö, teh-dastoiminta, metsäpalot ja vulkaaninen toiminta

VOC-pitoisuudet sisäilmassa määrytyvät seuraavien tekijöiden mukaan: kuinka vahva haitta-ainelähde on, millainen on sisäilman ilmanvaihdon määrä ja toteutustapa, raken-nuksen ikä, vuodenaika, sisäilman suhteellinen kosteus, ilmentyneet kosteus ja homevau-riot sekä sisäilman muut kemialliset reaktiot. VOC-pitoisuuksien kasvun on yleisesti us-kottu vaikuttavan ihmisen terveyteen heikentävästi. TVOC:ien konsentraatio on normaa-listi alle 1 mg/m³ rakennuksissa, joita ei ole tarkoitettu teolliseen käyttöön, mutta monet tutkijat ovat sitä mieltä, ettei TVOC arvoja tulisi käyttää arvioitaessa ihmisen terveyden riskitasoa. TVOC-taso on kuitenkin yhteydessä yleiseen sisäilmanlaadun tasoon siltä osin, että sitä voidaan pitää indikoivana tekijänä testattaessa ilmanvaihdon tehokkuutta ja arvioitaessa rakennuksen materiaaliemissioiden yleistaso. (Salonen, Pasanen ym. 2009) Normaalisti toimiston sisäympäristön TVOC-taso vaihtelee muutamasta mikrogram-masta muutamaa milligrammaa kuutiometriä kohden. Ilmanäytteestä otettujen kaasui-

maisten yhdisteiden määrä voi olla jopa 250 eri yhdistettä, mutta yleensä lukema vaihtelee välillä 20 ja 150. Tilastollisesti tyypillisimmät kaasut, joita sisäilmasta on löydetty, ovat orto-ksyleeni (1,2-dimetyylibentseeni), bentseeni, meta- ja para-ksyleeni (1,3-dimetyylibentseeni ja 1,4-dimetyylibentseeni), etyylibentseeni, trikloorietyleeni ja tolueeni. (Salonen, Pasanen ym. 2009)

Formaldehydin ja ammoniakkin konsentraatiot ovat pienempiä toimistorakennusten kuin asuntojen sisäilmassa. Formaldehydia on mitattu useissa sisäilmatutkimuksissa ja on raportoitu, että kouluissa ja muissa julkisissa formaldehydipitoisuus on 3...60 µg/m³. Ammoniakkipitoisuus on normaalisti alle 20 µg/m³. (Salonen, Pasanen ym. 2009)

Materiaalien aiheuttamat VOC-päästöt saattavat kasvaa materiaalien kostuessa tai lämmetessä. Tämän kaltaisia päästöjä on paljon juuri valmistuneissa taloissa. Yleensä päästöt laskevat normaalitasolle noin puolessa vuodessa rakennuksen valmistumisen jälkeen, jos asunnon ilmanvaihto toimii oikein. (Salonen, Pasanen ym. 2009) Vaikka materiaalien VOC-päästöt yleensä vähenevät merkittävästi ensimmäisen vuoden kuluessa rakennuksen valmistumisesta tai peruskorjauksesta, sisäilman VOC-tasot vakiintuvat lopullisempaan tasoon usein vasta kahden vuoden kuluttua rakennuksen käyttöönotosta (Salonen, Lappalainen ym. 2011a). Ilma voi myös sisältää normaalisti luonnossa esiintyviä yhdisteitä kuten metaania ja muita kasvihuonekaasuja, joita muodostuu esimerkiksi eloperäisen aineksen mädäntyessä hapettomissa oloissa. Toisaalta metaanikaasua voi muodostua myös fossiilisten polttoaineiden jalostuksessa, mikä on täysin ihmisen toiminnasta aiheutunutta.

Ihmisetkin tuottavat sisäilmaan VOC:ejä kuten alkoholeja ja alkaaneja, mutta myös etyyliasetaattia ja etikkahappoa. Tämän lisäksi useat ihmisen toiminnot vaikuttavat VOC-pitoisuuksiin sisätiloissa, joista tunnettuja ovat muun muassa kopiokoneen, tietokoneen ja tulostimen käyttö, pintojen puhdistus, ruuanlaitto, kosmetiikkatuotteiden käyttö, tupakointi, maalaaminen ja liuotteiden käyttö. Esimerkiksi kopiokoneen käyttö ja siivous voivat lisätä tiettyjen reaktiivisten kemikaalien, kuten otsonin ja terpeenien, pitoisuutta sisäilmassa. Nämä yhdisteet saattavat reagoida keskenään ja muiden reaktiivisten ainesosien kanssa muodostaen uusia hapettumistuotteita. Tämän kaltaisia lopputuotteita ovat esimerkiksi mono- ja dikarboksyylilihapot, aldehydit ja ketonit. Lisäksi reaktioiden yhteydessä saattaa muodostua lyhytikäisiä reaktiivisia välituotteita sekä alle mikrometrin suuruisia hiukkasia. (Salonen, Lappalainen ym. 2011a) Taulukossa 7 on esitetty joitakin tunnettuja VOC-yhdisteiden tai -yhdisteryhmien ja rakennustuotteiden välistä yhteyttä sisäilman kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden emissiossa sisäilmassa.

Sisäilman VOC:n ominaisuuksia tutkittaessa voidaan emissioita jakaa myös primäärisiin tai sekundaarisiin emissioihin. Primäärisissä emissioissa VOC:n lähteet ovat suorassa vaikutuksessa sisäilmaan, eli kehittyvät sisäilmassa jonkin sisätiloissa tapahtuvan aktiviteetin seurauksena tai kulkeutuvat sisäilmaan ulkoilmassa tapahtuvista aktiviteeteista ilman, että sen koostumus muuttuu radikaalisti matkan varrella. VOC:n sekundaarisen emission syynä voidaan pitää sellaisia tapahtumia, missä rakennusmateriaalien adsorptio- ja desorptioprosessit tai kemialliset reaktiot materiaalien pinnoilla tai sisällä aiheuttavat tiettyjen yhdisteiden muodostumista. Lisäksi kemiallisia reaktioita voi tapahtua sisäilmassa eri VOC-yhdisteiden reagoidessa keskenään tai VOC:n ja epäorgaanisten kaasujen, kuten otsonin ja typpioksidin, yhteisvaikutuksesta. Primaari- ja sekundaariemissioista on kerrottu lisää kappaleessa 4.1.

Taulukko 7. Rakennustuotteista mitattuja VOC- yhdisteiden ja yhdisteryhmien sekä rakennustuotteiden välisiä yhteyksiä koskien sisäilman emissioita (Järnström, Saarela 2005).

Rakennustuote	VOC-yhdiste/yhdisteryhmä
Muovimatto (PVC)	Alkaanit, aromaattiset yhdisteet, 2-etyyliheksanoli, TXIB (esteriyhdiste)
Parketti (Puu)	C ₅ -C ₆ -aldehydit, terpeenit
Linoleum	C ₅ -C ₁₁ -aldehydit, terpeenit, alifaattiset hapot, bentsaldehydi
Kumimatto	Asetofenoni, alkyloidut aromaattiset yhdisteet, styreeni
Liima	C ₉ -C ₁₁ -alkaanit, tolueeni, styreeni
Lakka	Alkaanit, aldehydit
Maali	Alkaanit, glykolit, glykoliesterit, Texanol
Saumausaine	Ktonit, esterit, glykolit, polyklooratut bifenyylit, siloksaani
Lastulevy	Alkaanit, aldehydit, ketonit, butanoli, formaldehydi

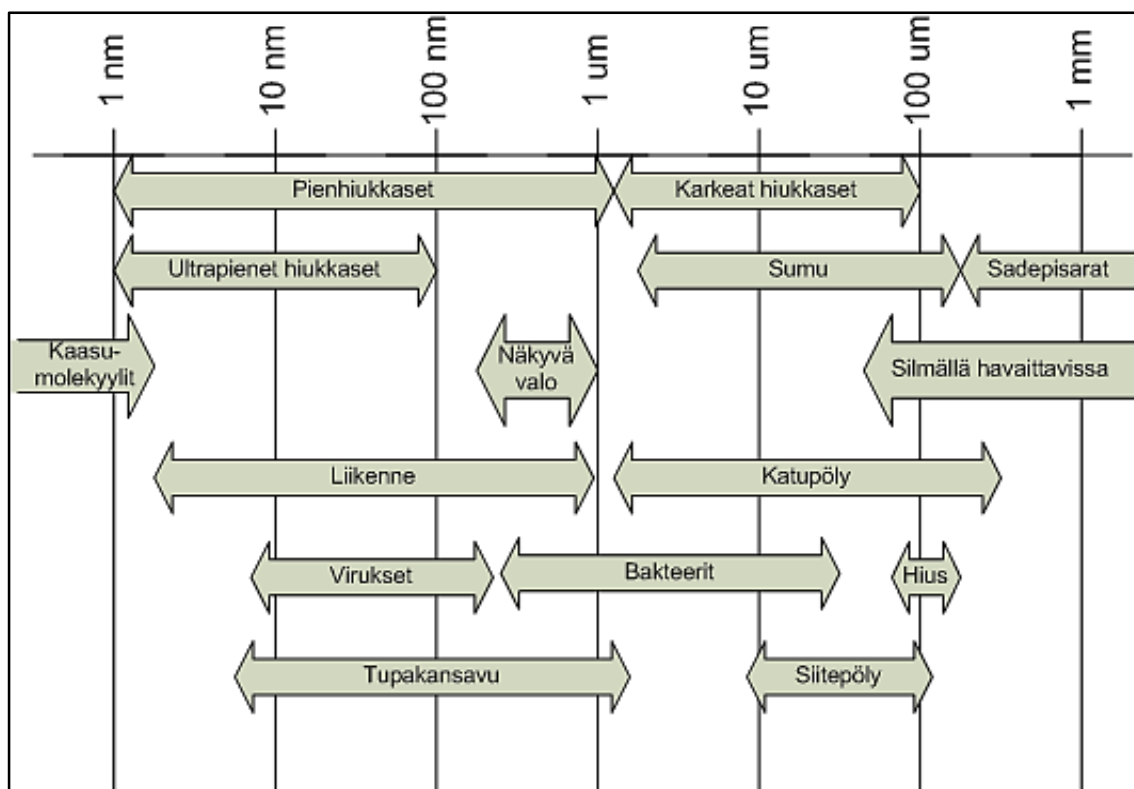
3.5.2 Aerosolihiukkaset

Ilmassa esiintyvä aerosoli tarkoittaa kaasumaista väliainetta ja siinä leijuvia kiinteitä tai nestemäisiä hiukkasia ja on siis määritelmänsä mukaan monifaasisysteemi eli useassa eri olomuodossa olevien aineiden seos (Riipinen, Lehtipalo 2015). Aerosolit ja hiukkasmaiset partikkelit ovat erittäin merkittäviä sisäilman laadun heikentäjiä, johtuen niiden kyvystä sisältää monimutkaisia orgaanisia ja epäorgaanisia aineita, jotka voivat olla myrkyllisiä ja saattavat aiheuttaa hengitysteiden tulehdusta, allergiaa, tai jopa syöpää (Braniš, Rezácová ym. 2005). Lisäksi pienikokoiset hiukkaset omaavat kyvyn tunkeutua hengitysteihin aina keuhkoihin saakka (Braniš, Rezácová ym. 2005). Hengitettyjen aerosolien ja hiukkasten terveysvaikutukset riippuvat niiden fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista sekä siitä, mihin kohtaan hengityselimistöä ne deposoituvat. Ylähengitysteiden ja keuhkoputkien pintaa peittävät värekarvat, jotka kuljettavat niihin tarttuneet hiukkaset liman mukana pois hengityselimistöstä muutamassa tunnissa, kun taas keuhkorakkuloihin asti päätyneet liukenemattomat hiukkaset puolestaan poistuvat hitaasti, vasta kuukausien tai vuosienkin kuluessa makrofagien nielemänä tai kuljetettuina imusolmukkeisiin (Riipinen, Lehtipalo 2015). Liukenevat tai ultrapienet hiukkaset taas voivat imeytyä keuhkorakkuloista verenkiertoon ja sitä kautta negatiivisesti vaikuttaa ihmisen terveyteen (Riipinen, Lehtipalo 2015). Yleisimmin hiukkasten uskotaan aiheuttavan oireita erityisesti astmatikoille ja muille hengitystiesairauksia poteville, huonontavat keuhkojen toimintakykyä ja lisäävät sairaalakäyntejä (Pekkanen 2004), mutta monet tutkimukset ovat osoittaneet myös vakavien sairastumisten sekä kuolleisuuden ja hiukkasten määrän korreloivan (Dockery, Pope ym. 1993).

Hiukkaset määritellään yleensä aerodynaamisen halkaisijansa mukaan mittayksikössä mikrometri tai nanometri. Sisäilman hiukkaset voidaan jaotella kokonsa perusteella kokonaisleijumaan, hengitettäviin hiukkasiin ja pienhiukkasiin. Kokonaisleijumalla tarkoitetaan kaikkia ilmassa leijuvia hiukkasia, joiden massapitoisuudesta suurin osa on karkeaa pölyä. Hengitettävät hiukkaset (PM_{10}) ovat aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle 10 μm :n hiukkasia ja pienhiukkaset ($PM_{2.5}$) ovat vastaavasti halkaisijaltaan alle 2,5 μm :n kokoisia. (Salonen, Lappalainen ym. 2011a, Riipinen, Lehtipalo 2015, STM 2003) Lisäksi ilma voi sisältää ultrapieniä hiukkasia, joiden läpimitta on 0,01–0,1 μm tai kertymähiukkasia, joiden läpimitta on 0,1–1 μm (Pekkanen 2004, Penttinen, Timonen ym. 2001). Näiden pienempien aerosolihiukkasten olemassaoloa ja vaikutuksia on alettu selvittää sen jälkeen, kun nanoteknologia alkoi kehittyä, eikä tarkalleen vielä tiedetä, missä määrin ne vaikuttavat terveyteen tai mikä niiden yhteys on kuolemantapauksiin. Tähänastisten tutkimusten mukaan terveyshaittojen arvellaan kuitenkin yhdistyvän erityisesti $PM_{2.5}$ -hiukkasiin (WHO 2003).

Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet hiukkasmäärien kasvun ulkoilmassa korreloivan voimakkaasti terveydentilan alenemiseen, kuten keuhkojen toimintakyvyn heikkeneemiseen, keuhkosairauksien lisääntymiseen, verisuonisairauksien määrän kasvuun sekä jopa kuolemantapauksiin liittyviin tekijöihin. Vielä ei ole kuitenkaan täysin selvää, millä mekanismeilla hiukkaset heikentävät terveyttä. Ihminen altistuu enimmäkseen sisäilman partikkeleihin viettäessään suuren osan ajastaan sisätiloissa. Kuitenkin hiukkasten alkuperä voi olla sekä sisäisistä, että ulkoisista lähteistä ja yleisesti ottaen ulkoilmassa hiukkastaso on sisäilmaa korkeampi. Aerosolien kulkumekanismit sisätilaan ovat vahvasti yhteydessä niiden aerodynaamisiin ominaisuuksiin ja kokoon. (Riley, McKone ym. 2002) Näin ollen rakennuksen tuloilman suodatus ja rakenteiden tiiveys on tärkeässä roolissa sisäilmassa esiintyvien aerosolihiukkasten osalta.

Aerosolihiukkasen laskeutumisnopeus riippuu vahvasti hiukkasen aerodynaamisesta halkaisijasta: 100 μm :n kokoinen hiukkanen putoaa keskimäärin nopeudella 25 cm/s, 10 μm :n kokoinen nopeudella 3 mm/s ja 1 μm :n kokoinen enää nopeudella 0,03 mm/s. Pienhiukkasten, alle 2,5 μm , putoamisnopeudet ovat niin pieniä, että sedimentaatio on täysin merkityksetöntä ilmavirran liikkeisiin ja diffuusioon verrattuna. Karkeille hiukkasille sedimentaatio on kuitenkin merkittävä depositionsmekanismi. (Riipinen, Lehtipalo 2015) Kuvassa 7 on esitetty erityyppisten aerosolihiukkasten kokoja.

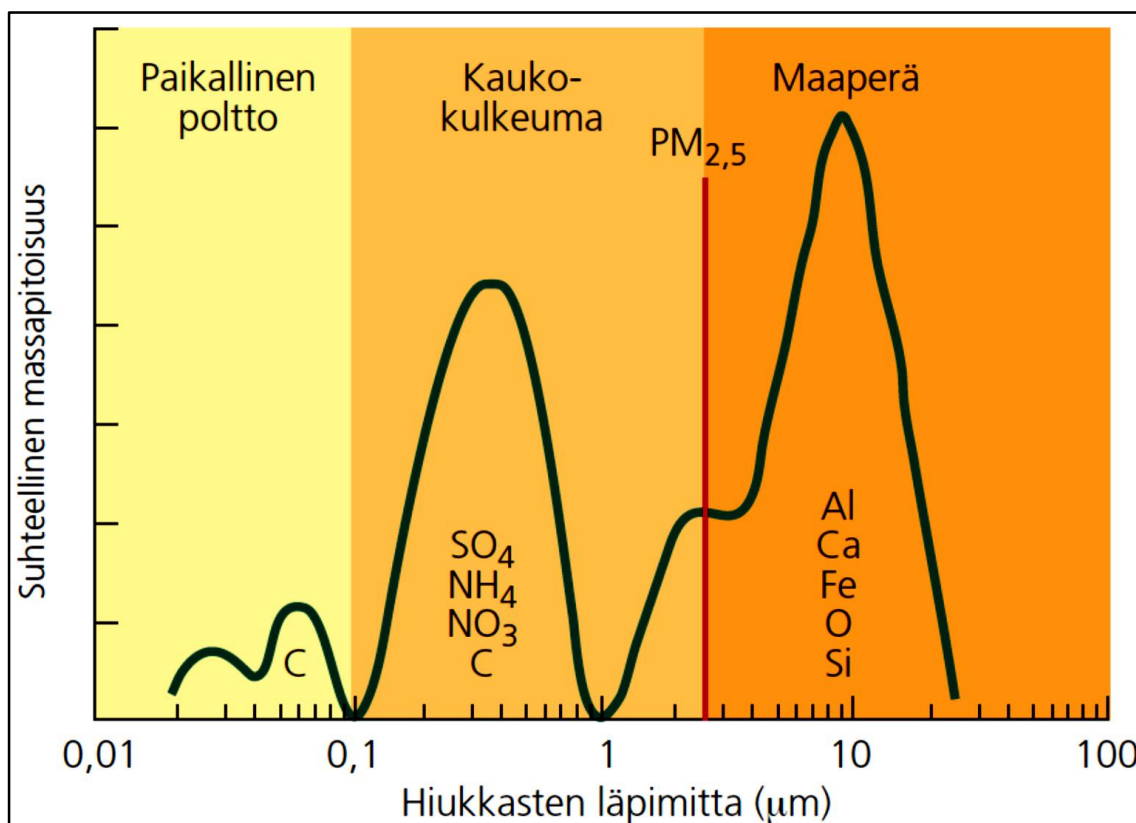


Kuva 7. Esimerkkejä tyypillisistä aerosolihiukkasista ja niiden halkaisijoista. (Riipinen, Lehtipalo 2015)

Sekä rakennuksen ulko- että sisäpuoliset lähteet vaikuttavat sisätiloissa olevien hiukkasten konsentraatioihin ja koostumuksiin. Tänä päivänä löytyy huomattavasti enemmän ajankohtaista informaatiota, sekä tutkimuksia liittyen ulkoilman hiukkaspitoisuuksiin ja niiden lähteisiin verrattuna rakennuksen sisäisiin pitoisuuksiin ja ennen kaikkea sisäisiin lähteisiin verrattuna. Dominoivimpina sisäilman hiukkaslähteinä pidetään tupakanpolttoa, ruuanlaittoa, puunpolttoa ja muita energian lähteitä. Lisäksi nykypäivän kodinkoneiden sähköiset moottorit ja laitteet, sisätiloissa olevat lemmikit, imurointi, ilmastointi ja jotkin muut ihmisen toiminnot kuten, suihkussa käynti ja kynttilän poltto, vaikuttavat hiukkastason. Pienhiukkasten osalta tärkeimmät sisäilman lähteet ovat erinäiset palamisreaktiot, joissa valtaosa tuotetuista hiukkasista on aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle $1 \mu\text{m}$ ja nämä ovat useimmiten sitoneet itseensä sekä orgaanisia, että epäorgaanisia yhdisteitä. Sen sijaan ihmisten muut toiminnot synnyttävät useimmiten yli $1 \mu\text{m}$:n kokoisia hiukkasia. (He, Morawska ym. 2004) Karkeat hiukkaset ovat sen sijaan pääosin maaperän kiviainesta, esimerkkinä liikenteen ja nastarenkaiden asfaltista irrottama pöly ja hiekoitushiekka eli niin kutsuttu kevätpöly (Pekkanen 2004).

Sisäilmassa olevien hiukkasten määrään ja laatuun vaikuttaa useat muuttujat, kuten ilmanvaihdon taso, paine-erot rakenteiden läpi, hiukkasten kulkureitit, sisätilojen ihmisten toiminta, ulkoilman hiukkastasot, eri prosesseista ja ilmiöistä aiheutuvat hiukkaspäästöt, paikalliset ja laajemman mittakaavan ilmiöt, kuten tulivuorten purkaus, sisä- ja ulkoilmassa olevien hiukkasten aerodynaamiset ominaisuudet ja koko sekä ilman kosteus ja lämpötila (Braniš, Rezacová ym. 2005). Yleisimpiä hiukkasten ulkoilmalähteitä Suomessa ovat maaperä, polttoprosessit ja energian käyttö sekä liikenne, kuten kuvista 8 ja 10 ilmenee (Hänninen, Asikainen). Nämä päästölähteet voidaan jakaa myös sisäisiin ja ulkoisiin lähteisiin. Esimerkiksi maaperä, polttoprosessit ja liikenne ovat pääosin ulkoilmassa tapahtuvia ilmiöitä, kun taas sisäympäristössä suurimpia lähteitä ovat yleensä tupakointi, lämmitysjärjestelmät, ruuanvalmistus ja siivous (Salonen, Lappalainen ym. 2011a).

Useat ilmanvaihtosysteemit on suunniteltu ottamatta huomioon sisäilman partikkelien käyttäytymistä ilmavirtojen suhteen. Syrjäyttävässä ilmanvaihdoissa oletetaan kaikkien epäpuhtauksien kulkeutuvan vertikaalisesti korkeammille ja sitä kautta poistoilman vaikutuspiiriin, mikä ei kuitenkaan pidä aina paikkansa, sillä esimerkiksi partikkelien muoto, koko ja koostumus vaikuttaa voimakkaasti kiinteiden partikkelien aerodynaamisiin ominaisuuksiin, jolloin eri aerosolit liikehtivät ja asettuvat eri tavoin. (Holmberg, Chen 2003) Sisäilman hiukkasmaisiin epäpuhtauksiin luetaan myös teolliset mineraalikuidut (MMVF), joita voi kantautua sisäilmaan esimerkiksi huoneen akustiikkalevyistä tai ilmanvaihdon lämmön- ja ääneneristykseen käytetyistä mineraalikulitulevyistä (Salonen, Lappalainen ym. 2011a). Kuvassa 8 on esitettyä yleisimpien erikokoisten hiukkasten massaosuudet ulkoilmassa sekä niiden yleisimmät sisältämät kemialliset yhdisteet.



Kuva 8. Kaavio kaupunki-ilman hiukkasten massapitoisuuksista ja niiden lähteistä. Ultrapienet hiukkaset (läpimitta alle 0,1 µm) ovat kemialliselta koostumukseltaan pääosin hiiliyhdisteitä (C), kaukokulkeuma (0,1–1 µm) koostuu rikin (SO₄) ja typen (NO₃) oksideista ja hiiliyhdisteistä (C), ja karkeat hiukkaset (yli 1 µm tai 2,5 µm) ovat maaperän alkuaineita, kuten piitä (Si) ja alumiinia (Al) (Pekkanen 2004).

Sisätilaan voi kehittyä myös niin kutsuttuja sekundaarisia aerosolihiukkasia, joiden muodostuminen tapahtuu kaasumaisten epäpuhtauksien muuntautuessa hiukkasiksi, mikäli kaasumaisille yhdisteille löytyy sopivia sitoutumiskeinoja. Rohr ym. (2003) osoittivat kammiokokeillaan otsonin ja valikoitujen terpeenien merkityksen alle 1 µm:n kokoisten hiukkasten syntymiselle, kaasujen reagoidessa keskenään ja muiden ilmalle ominaisten yhdisteiden kanssa, jolloin pienhiukkasia ja nanohiukkasia muodostui kaasun deformaatiessa kiinteiksi partikkeleiksi. (Rohr, Weschler ym. 2003)

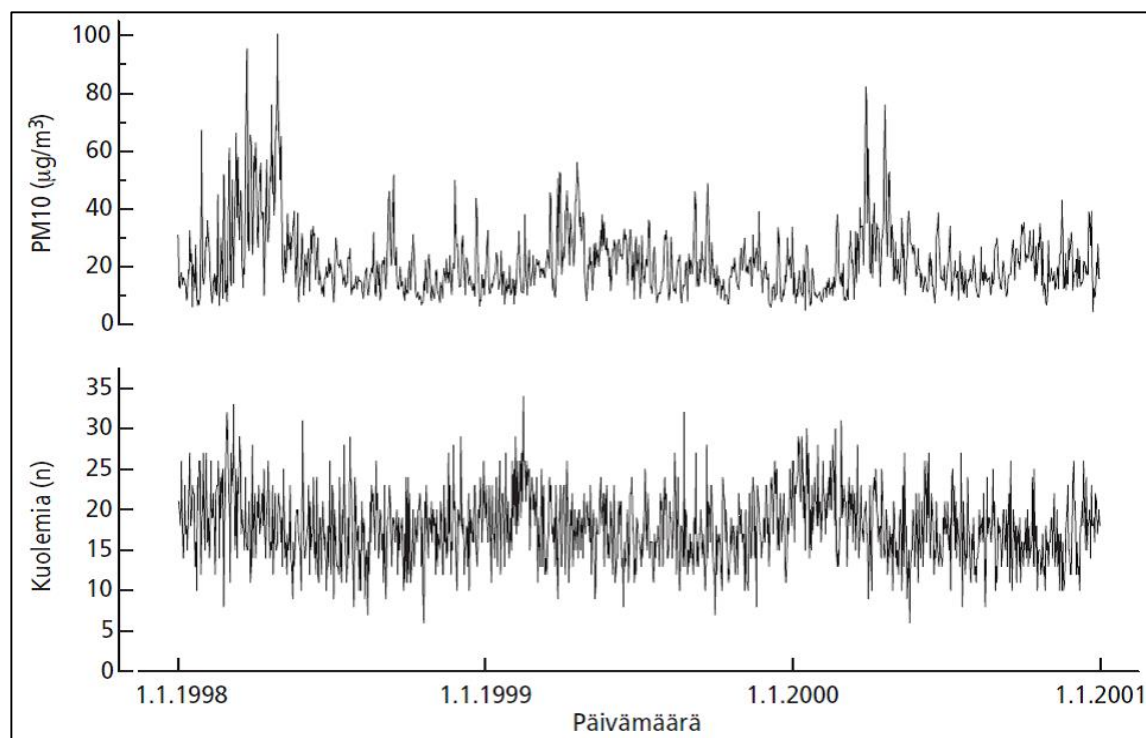
Tähän mennessä on tutkittu huomattavasti enemmän eri hiukkaslajien massakonsentraatioita eikä niinkään yksittäisten, hiukkaskoon mukaan kategorisoituvan, partikkelien kokonaismäärää sisäilmassa. Viimeaikaiset, terveydellisiä vaikutuksia tutkineet tutkimukset ovat nostaneet esille nimenomaan pienikokoisten partikkelien lukumäärää mittaavien tut-

kimusten tärkeyttä, koska pienemmät hiukkaset pystyvät kulkeutumaan helpommin syvälle hengityselimiin ja sisältävät suhteessa suurempia määriä erilaisia hivenaineita, toksiineja, aromaattisia hiilivetyjä sekä mutageeneja kuin isommat hiukkaset (Penttinen, Timonen ym. 2001, He, Morawska ym. 2004). Eräissä laboratoriotutkimuksissa, missä rottia altistettiin tiettyjä yhdisteitä sisältäville hiukkasille, huomattiin, että pienhiukkasia sisältävän ilman vaikutukset rottien ärsytysoireisiin eivät olleet niin voimakkaita, kuin saman massakonsentraation omaavan ultrapieniä hiukkasia sisältävän ilman vaikutukset (Morawska, Jayaratne ym. 2002). Tutkimustulosten perusteella on syytä tehdä lisätutkimuksia erikokoisten hiukkasten haittavaikutuksista ihmiseen.

3.5.2.1 Pienhiukkaset PM2.5

Pienhiukkasilla on todettu olevan erittäin suuri vaikutus ihmisten terveyteen, sillä ne ovat usein orgaanisen aineen palamisreaktioista syntyviä partikkeleita ja voivat sisältää metalleja, nitraatteja tai joitain happoja, jotka ovat terveydelle erittäin vaarallisia tai haitallisia. Tämän lisäksi niillä on kokonsa vuoksi kyky tunkeutua syvälle hengityselimiin aina keuhkoihin saakka. (Pope III, Dockery 2006) Monissa tutkimuksissa on ilmennyt, että pienhiukkaset aiheuttavat keuhkoissa oksidatiivista stressiä ja sitä kautta tulehdusta, joka huonontaa muun muassa keuhkosairautta potevan vointia sekä lisää veren hyytymistekijöiden vaaraa ja sitä kautta lisää sydän- ja verisuonitauteja tai jopa sydäninfarktin riskiä (Pope III, Dockery 2006, Donaldson, Stone ym. 2001).

Pienhiukkasten terveysvaikutuksista on tehty erittäin suuri määrä aikasarjatutkimuksia eri puolilla maailmaa, mutta ne eivät useinkaan kerro pienhiukkasten pitkäaikaisesta vaikutuksesta kuolleisuuteen eli vaikutuksesta elinikään (Pekkanen 2004). Vastaavanlaisia suoria yhteyksiä ja tutkimuksia on tutkittu myös Suomessa. Kuvassa 9 on esitetty hengitettävien hiukkasten ja kuolleisuuden yhteyttä Suomessa tehdyissä mittauksissa.



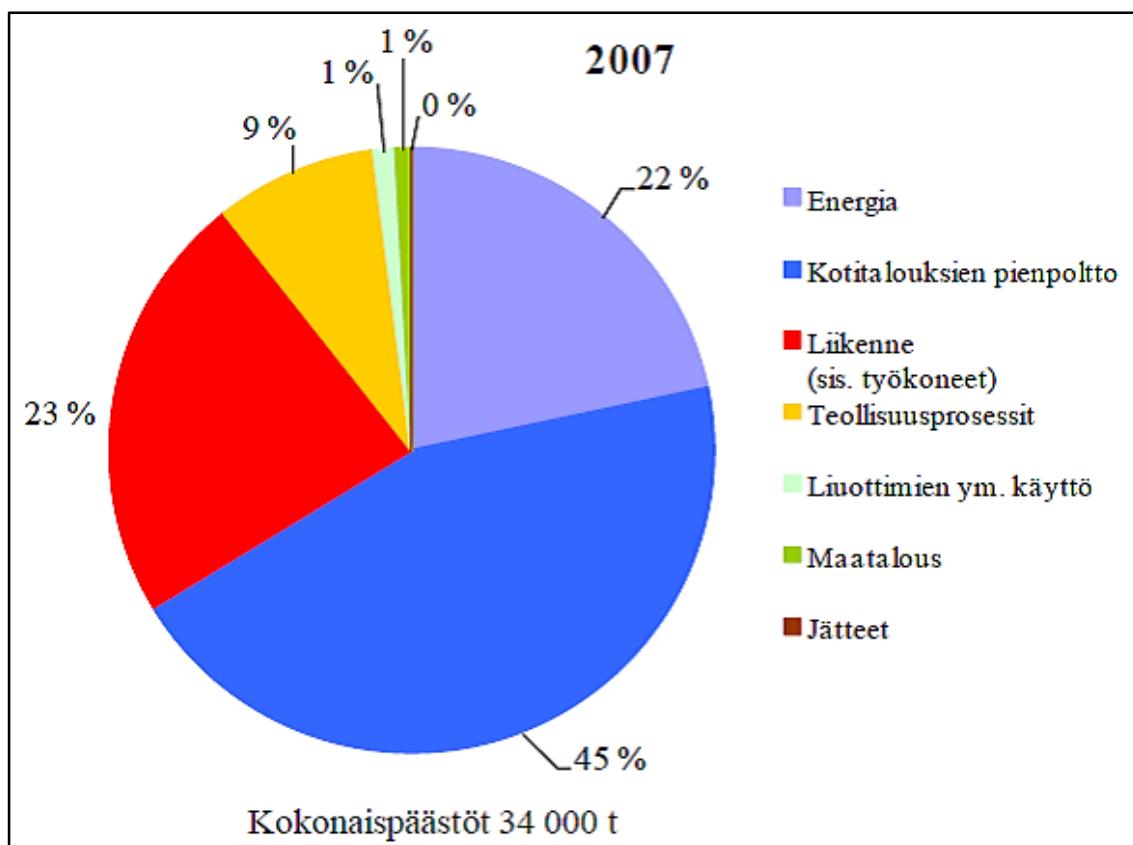
Kuva 9. PM10-pitoisuuden ja kuolemien lukumäärän päivittäinen vaihtelu pääkaupunkiseudulla vuosina 1998–2000 (Pekkanen 2004).

Suomen hiukkasmäärät ovat kuitenkin melko alhaisella tasolla, ainakin $PM_{2.5}$:n ja PM_{10} :n osalta, minkä takia suoraa yhteyttä ei ole niin helppoa luoda kuolemantapauksien tai vakavien sairauksien ja hiukkastasojen välille verrattuna maihin, joissa on korkeammat pitoisuudet. Ulkomaisissa tutkimuksissa on saatu selkeitä viitteitä pienhiukkasten terveysvaikutuksista ja kuolemaan johtaneista tapauksista. Dockery ym. (1993) havaitsivat kuusi kaupunkia ja 8111 ihmistä käsittävissä tutkimuksissa, että tutkittavien kuolleisuus lisääntyi suorassa suhteessa mittauspaikkakunnan keskimääräisen pienhiukkaspitoisuuden kasvuun (Dockery, Pope ym. 1993). Sen sijaan pienhiukkasten väheneminen Dublinissa sai aikaan ilmiön, missä kuolleisuus hengityselinsairauksiin sekä sydän- ja verisuonitauteihin väheni, kun vuonna 1990 hiilen käyttö lämmitystarkoitukseen kiellettiin Irlannissa. Clancy ym. (2002) arvioivat, että muun muassa hengitystiesairaudet vähenivät 5 – 15 %, sekä sydän- ja verisuonitautien kuolemantapaukset alenivat 3 – 10 %, kun kivihiilen polton lopettamisen jälkeen savukaasujen määrä Dublinissa oli laskenut noin 70 % (Clancy, Goodman ym. 2002).

Toksikologisten tutkimusten mukaan pienhiukkasten ominaisuuksilla on merkittävä yhteys hiukkasten terveysvaikutuksiin (Saldiva, Clarke ym. 2002). Keskeistä ominaisuutta, joka selittäisi pienhiukkasten terveysvaikutukset, ei kuitenkaan ole pystytty osoittamaan (Pekkanen 2004). Pienhiukkasten ja rikin oksidien yhteisvaikutusta tutkittiin ja tuloksista todettiin sydänsairauksien keuhkosityövän riskin kasvavan muutamia prosentteja riippuen altistuksen määrästä ja altistetusta henkilöstä (Pope III, Burnett ym. 2002).

Merkittävä osa sisäilman pienhiukkasista on peräisin ulkona tapahtuvista palamisreaktioista, kuten liikenteen, energiantuotannon ja teollisuuden päästöistä sekä puun pienpoltosta ja sisäilmasta peräisin olevien hiukkasten lähteinä voivat olla muun muassa tupakansavu ja tekstiilit. Hiukkasten pitoisuuksia sisäilmassa on kuitenkin tutkittu melko vähän, jonka takia ei voida varmuudella määrittää nyrkkisääntöjä sen pitoisuuksien aiheuttavista tekijöistä sisäilmassa. Partikkelien ja hiukkasten kulkeutuminen sisätilaan on useimmiten peräisin tuloilmasta, luonnollisesta konvektiosta ja diffuusiosta, paine- ja lämpötilagradienteista, ihmisen toiminnasta sekä muista seikkaperäisistä lähteistä (Sundell, Levin ym. 2011).

Suomen kaupungeissa tyypillinen PM_{10} -vuosikeskiarvo on noin $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, josta noin puolet on $PM_{2.5}$ -hiukkasia. Helsingissä kaupunki-ilman $PM_{2.5}$ -pitoisuudesta runsas puolet muodostuu kaukokulkeumahiukkasista, 10–20 % liikenteessä ja muussa poltossa syntyneistä hiukkasista sekä pieneltä osalta merisuolasta ja hiekkapölystä. (Vallius, Lanki ym. 2003) Suomen ympäristökeskuksen arvioiden mukaan jopa 45 % Suomen $PM_{2.5}$ -päästöistä on peräisin hajalämmityksestä ja pienpoltosta. Pienhiukkasaltistumisessa kaupunkiseudulla puun polton osuus on kuitenkin pienempi, sillä tiheään asutuilla alueilla harjoitetaan toistaiseksi vähemmän puun pienpolttoa kuin haja-asutusalueilla (Pekkanen 2004). Kuvasta 10 ilmenee pienhiukkaspäästöjen päästölähteet ja -määrät vuodelta 2007.



Kuva 10. Pienhiukkaspäästöjen jakautuminen eri päästösektoreihin 2007 (Alaviippola, Pietarila 2011).

Kaukokulkeuma muodostaa huomattavan osan Suomessa havaituista pienhiukkaspitoisuuksista ja pienhiukkaset kulkeutuvat ilmassa mukana jopa tuhansia kilometrejä. Hiukkasten kaukokulkeumaepisodien aikana ilmanlaatu voi heikentyä voimakkaastikin kun Suomeen kulkeutuu pienhiukkasia ulkomaisista hiukkaspäästölähteistä, esimerkiksi maasto- ja metsäpaloista. Lisäksi sekundäärisiä pienhiukkasia muodostuu muuntamalla kaasumaisista epäpuhtauksista. (Alaviippola, Pietarila 2011). Näin ollen on entistään tärkeämpää pyrkiä vaikuttamaan sisäilmaan kulkeutuneiden hiukkasten määrään rakennus- ja taloteknisillä valinnoilla, sillä usein ulkoilman hiukkastason ei pystytä vaikuttamaan, jos hiukkaslähde on jokin muu kuin Suomen rajojen sisällä tapahtuva mekanismi.

Ilmanlaatudirektiivissä (2008/50/EY) on annettu pienhiukkasten vuosikeskiarvopitoisuudelle tavoite- ja raja-arvot. Tavoitearvo $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tuli alittaa 1.1.2010 mennessä ja raja-arvo $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tulee saavuttaa vuoteen 2015 mennessä. 2. vaiheen raja-arvo $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on suuntaa-antava raja-arvo, jota komissio tarkastelee uudelleen tulevinä vuosina. Suomessa saatettiin ilmanlaatuasetuksella (Vna 38/2011) voimaan pienhiukkaspitoisuuden raja-arvo $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, jota sovellettiin heti tavoitearvon sijasta. (Alaviippola, Pietarila 2011) Raja-arvot on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Pienhiukkaspitoisuuden tavoitearvo ja raja-arvot (Alaviippola, Pietarila 2011).

	PM _{2,5} vuosikeskiarvo	Saavutettava
Tavoitearvo	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	1.1.2010
Raja-arvo (1. vaihe)	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	1.1.2015
Raja-arvo (2. vaihe)	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	1.1.2020

Vaikka pienhiukkasten lähteet ovat useimmin ulkona, on sisällä tapahtuva altistuminen tärkeätä myös hiukkasten osalta. Toimistorakennuksissa on jo pitkään suodatettu ilmanvaihdon tuloilmaa. Mikäli vastaavaa tekniikkaa käytettäisiin myös asuinrakennuksissa, olisi mahdollista vähentää suomalaisten hiukkasaltistusta melkoisesti, sillä länsimaissa ihminen viettää suurimman osan ajastaan kotiloissa. Lisäksi on oleellista ottaa huomioon rakenteiden tiiveys ja painesuhteet, jotta hiukkasmaisia epäpuhtauksia ei pääsisi ilmanvuotokohtien kautta sisätiloihin.

3.5.3 Formaldehydi

Yleisesti voidaan sanoa formaldehydin pitoisuuden olevan korkeampi sisätiloissa kuin ulkona, johtuen pääosin sisätilassa tapahtuvan tuoton korkeammasta tasosta ja ilmanvaihduvuuden vähäisyydestä verrattuna ulkoilman spontaanisti tapahtuvaan ilmanliikkeeseen. Formaldehydi on aldehydeihin kuuluva haihtuva orgaaninen yhdiste. Se on pistävän hajuihin ja väritön kaasua. Nopeasti nesteeseen liukenevana aineena, formaldehydillä on kyky absorboitua lyhyessä ajassa hengitysteiden limakalvoille ja jopa ruoansulatuskanavaan. Formaldehydin biologisen puoliintumisajan ollessa vain noin yhden minuutin pituinen, kykenee se reagoimaan ihmiskehossa muodostaen kovalenttisia sidoksia elope-
räisten yhdisteiden kanssa. Eläinkokeisiin perustuvien tutkimusten mukaan formaldehydin aiheuttamat terveysoireet ovat ensisijaisesti limakalvojen, hengitysteiden ja silmien ärsyntyminen. (Salthammer, Mentese ym. 2010)

Formaldehydistä on kirjoitettu ensimmäisen kerran jo vuonna 1855 venäläisen tiedemiehen, Alexander Michailowitsch Butlerow, toimesta eli kyseessä on sinänsä hyvin tuttu ja tunnettu kemiallinen yhdiste. Vuosina 1900 - 1930 formaldehydipohjaiset hartsit olivat tärkeässä roolissa osana puu- ja puukomposiittituotteiden liima-aineena ja toisen maailmansodan jälkeen, formaldehydiä sisältävien lastulevyjen käyttö lisääntyi merkittävästi ympäri maailmaa. 1960-luvulla alettiin havaita formaldehydiin liittyviä terveysongelmia ja niistä raportoitiin ensimmäistä kertaa 60-luvun puolella välissä tieteellisissä teksteissä. Tällöin pantiin merkille, että talot jotka sisälsivät lastulevyä ja oli rakennettu puuelementtejä hyväksikäyttäen, aiheuttivat rakennuksen käyttäjälle erityisesti silmien ja ylempien hengitysteiden ärsytysoireita. Vaikka formaldehydipitoisuudet sisätiloissa ovat viimeisten vuosikymmenien aikana alentuneet, on edelleen viitteitä yksittäisistä korkeista konsentraatioista sisäilmassa. Muun muassa Saksassa on 90-luvulla havaittu sisustusmateriaaleista emittoituvan suhteellisen suuria määriä formaldehydiä sisäilmaan ja Yhdysvalloissa uusissa puuelementtitaloissa on havaittu korkeita formaldehydiemissioita ja -pitoisuuksia vielä 2000-luvulla. Sisäilman formaldehydi on yleensä peräisin lastulevyjen ja muiden puupohjaisten rakennusmateriaalien liima-aineena käytetystä ureaformaldehydistä. Formaldehydiä vapautuu ilmaan myös tupakoinnista sekä joistain maaleista, pinnoitteista, tekstiileistä sekä joistain kiintokalusteissa ja huonekaluissa käytetyistä liimoista. (Salthammer, Mentese ym. 2010)

Viimeisen vuosikymmenen aikana formaldehydiin liittyvät haittavaikutukset, päästölähteet ja viranomais määräykset ovat nousseet jälleen pinnalle, kun 2004 formaldehydi todettiin IARC:n (International Agency for Research on Cancer) mukaan olevan karsinogeeninen aine, jolle altistumisella on todettu yhteys nenän ja nielun syövän sekä leukemian kanssa. Kuitenkin esimerkiksi ureaformaldehydiliima on edelleen erittäin käytetty aine muun muassa puupohjaisten tuotteiden ja huonekalujen valmistuksessa, johtuen sen kyvystä toimia nopeasti kovettuvana liima-aineena, halvasta hinnasta ja yhteensopivuudesta muiden lisäaineiden kanssa. (Salthammer, Mentese ym. 2010)

Formaldehydi ärsyttää silmiä ja ylempiä hengitysteitä. Ihmisten herkkyys formaldehydin ärsytysvaikutuksille vaihtelee suuresti. Formaldehydin hajukynnys on noin $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se voi kuitenkin aiheuttaa ärsytysoireita herkillä henkilöillä jo hyvin pienissä pitoisuuksissa ($5 - 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Formaldehydin tutkiminen on tarpeen, jos sisäilmassa on havaittavissa formaldehydin hajua. Jos huonetilassa on käytetty runsaasti lastulevyä rakenteissa tai kalusteissa (yli $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$) tai jos huoneistossa on esiintynyt kosteusvaurioita ja rakennuksen käyttäjien oireilu viittaa formaldehydialtistukseen on formaldehydipitoisuuden mittaaminen myös tarpeen. (STM 2003) Tuoreimman asumisterveysasetuksen mukaan toimenpideraja formaldehydin pitoisuudelle sisäilmassa on vuosikeskiarvolle $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja lyhyen ajan keskiarvopitoisuus 30 minuutin mittauksen aikana ei saa ylittää $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (STM 2015).

Formaldehydin terveysvaikutuksia on tutkittu jonkin verran myös eläinkokeiden avulla. Hiirille suoritetuissa kokeissa RD₅₀-arvot olivat välillä 3,1 – 5,3 ppm altistusajan ollessa 5 – 10 minuuttia ja alhaisimmat formaldehydin pitoisuudet, joissa havaittiin ihmisille aiheutuvan oireita, ovat tutkimusten mukaan olleet välillä 0,4 – 3 ppm, jolloin oireet olivat lievimmillään nuhan kaltaisia ja vaikeimmillaan kurkun ja silmien ärsytystä (Kuwabara, Alexeeff ym. 2007). RD₅₀ on yhdisteen pitoisuus, joka laskee hiiren hengitystiheyttä 50 % perusjakson keskiarvosta ja sen avulla voidaan luotettavasti arvioida muun muassa työpaikan ilman epäpuhtauksien sallittuja enimmäispitoisuuksia (HTP) (Villberg, Saarela ym. 2004).

3.5.4 Ammoniakki

Sisäilman ammoniakki kuuluu epäorgaanisiin kaasumaisiin yhdisteisiin. Ammoniakkipitoisuudet, joita Suomessa sisäilmassa tavataan, eivät yleensä itsessään muodosta terveysongelmaa, mutta ammoniakin normaalia suurempi esiintyminen sisäympäristössä voi olla indikaattorina sisäilman ongelmista. Ammoniakin kohonnut pitoisuus sisäilmassa saattaa viitata rakennusmateriaaleissa tapahtuvaan kemialliseen hajoamiseen. Tällaisten reaktioiden tapahtuessa ilmaan vapautuu myös muita kemiallisia yhdisteitä (VOC), kuten amiineja, aldehydejä, orgaanisia rikkiyhdisteitä ja rasvahappoja. (STM 2003) Ammoniakin esiintymistä voidaan pitää myös kosteusvaurion indikaattorina, sillä kosteuden vaikutuksesta proteiineja sisältävät rakennusmateriaalit, kuten jotkut tasoitteet, vaurioituvat ja erittävät ammoniakkia. Ammoniakkia voi vapautua myös maaleista, lakoista, puhdistus- ja pesuaineista sekä ihmisten ja eläinten eritteistä (TTL 2010).

Hajukynnys ammoniakille on noin $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sen sijaan esimerkiksi erilaisten amiinien hajukynnykset ovat 10...100 kertaa pienempiä kuin ammoniakin. Amiinit aiheuttavat kuitenkin ärsytystä pienemmissä pitoisuuksissa kuin ammoniakki, joka aiheuttaa ärsytysoireita, pitoisuuden kohotessa yli $160...410 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (STM 2003). Asian voi tulkita niin, että ihmisen aistiessa voimakasta ammoniakin hajua, sisäilma saattaa samanaikaisesti sisältää huomattavasti korkeampia amiinien tai muitten yhdisteiden pitoisuuksia.

Ammoniakin konsentraation ja sisäilman terveellisuuden korrelaatiota on tutkittu jo useiden vuosien ajan. 70- ja 80-luvulla paljon käytetty kaseiinipitoinen lattiatasoite on todettu korkeissa kosteusolosuhteissa hajoavan kaasumaisiksi yhdisteiksi muodostaen erityisesti ammoniakkia. Ilmiötä tutkittiin muun muassa eräässä ruotsalaisessa tutkimuksessa, kun kyseisen aikakauden rakennuksissa havaittiin lattiapinnoitteen värjäytymistä, sekä epämiellyttäviä hajuja. (Järnström, Saarela 2005) Lisäksi kaseiinia ja muita tyyppä sisältäviä aineita on käytetty vuosikymmenien ajan rakennusteollisuudessa muun muassa liimoissa, pohjasteissa, vesieristeissä, tasoitteissa ja orgaanisissa luonnonkuiduissa (Hiltunen 2000).

Eräissä Suomessa tehdyssä tutkimuksessa Helsingin kaupungin ympäristökeskus selvitti Sosiaali- ja terveysministeriön toimeksiannosta valtakunnallisesti asuntojen sisäilman ammoniakkipitoisuuksien määrää ja tutkimuskohteissa aiheutunutta sisäilmaongelmaa. Hiltunen (2000) mukaan tutkimusaineistosta saaduista tuloksista voitiin huomata, että suuria ammoniakkipitoisuuksia (yli 70 mg/m^3) esiintyi eniten asunnoissa, joissa kattopinnoitteena oli maalaamaton tasoite ja seinäpinnoitteena oli maali tai asunnoissa, joissa kattopinnoitteena oli maalaamaton tasoite ja lattiapinnoitteena oli muovimatto. Jos asunnossa oli samanaikaisesti muovimatto lattiapinnoitteena ja maalaamaton tasoite kattopinnoitteena, ammoniakkipitoisuudet olivat korkeat. Lisäksi rakenteiden yhteisvaikutuksista havaittiin, että katon ja seinärakenteen ollessa betonia, yli 200 mg/m^3 olevia ammoniakkipitoisuuksia esiintyi asunnoissa, joissa lattiapinnoitteena oli muovimatto ja kattopinnoitteena joko maalattu tai maalaamaton tasoite. (Hiltunen 2000) Kyseisten tutkimustulosten perusteella tehtiin myös johtopäätöksiä, joiden mukaan 90-luvulla rakennetuissa kerrostaloissa rakennuskosteus oli lisännyt ammoniakkiemissioita, johtuen kiireellisestä rakentamisen aikatauluista ja heikosta työmaa-aikaisesta kosteudenhallinnasta (Järnström, Saarela 2005).

3.5.5 Otsoni ja sen reaktiot sisäilmassa

Otsoni syntyy ulkona tapahtuvan valokemiallisten reaktioiden ja sähköpurkausten yhteydessä ja se kykenee kulkeutumaan pitkiäkin matkoja aktiivisessa muodossa, jos se ei kohtaa muita yhdisteitä, joiden kanssa reagoida. Sisälähteistä mainittakoon laitteet, joissa esiintyy sähköpurkauksia, kuten sähkösuodattimet, lasertulostimet ja kopiokoneet (Kauppinen, Hanhela ym. 2010). Otsonin tiedetään olevan kemiallisesti kaikkein reaktiivisin hengitysteihin vaikuttava kaasu, vaikuttaen useisiin veren ja hengitysteiden pitoisuuksiin ja lisäksi hengitysvastusta. Reaktiivisena kaasuna kohonnut otsonipitoisuus saattaa vaikuttaa myös infektioherkkyyden lisääntymiseen, silmien ärsytysoireisiin ja ylähengitysteiden oireisiin. Otsonilla on myös välillinen merkitys sisäilman haitallisten aineiden määrään sen reagoidessa sisäilman uuden haitallisten aineiden kanssa, jolloin reaktiotuotteet voivat olla jopa haitallisempia kuin lähtöaineet (Seppänen ym. 2004).

Sisätiloissa otsoni voi reagoida rakennusmateriaalien ja tyydyttymättömien orgaanisten yhdisteiden kanssa aiheuttaen uusia, terveydelle haitallisia reaktiotuotteita. Esimerkiksi otsonin ja puumateriaalista peräisin olevien terpeeniyhdisteiden reaktioissa ilman terpeenipitoisuus vähenee, mutta samalla ilman formaldehydipitoisuus nousee ja ilman pienhiukkasten sekä ultrapienien hiukkasten määrä kasvaa. Otsonin reaktiot joidenkin hiilivetyjen kanssa tiedetään myös muodostavan voimakkaasti ihmistä ärsyttäviä yhdisteitä ja aerosoleja. (Wolkoff, Wilkins ym. 2006) Eräiden VOC-yhdisteiden hapettumistuotteita ovat muun muassa formaldehydi, bentsaldehydi, asetoni, sykloheksanoni, nopinoni, 6-metyyli-5-hepten-2-oni, 4-asetyyli-1-metyyli-syklohekseni sekä muurahais- ja etikahappo (Järnström, Saarela 2005).

Pääasiallisena syynä ulkoilman korkeaan otsonipitoisuuteen on voimakas auringon säteily (Seppänen ym. 2004). Kohonneesta ulkoilman otsonipitoisuudesta voi seurata tuloilman mukana tuleva otsonivirta, mikäli se ei ole ehtinyt reagoida jo tuloilman kanavassa joidenkin yhdisteiden kanssa. Sisäilman otsonille ei ole terveysperusteista raja-arvoa, mutta työperäiseksi HTP-arvoksi on annettu 0,05 ppm kahdeksalle tunnille ja 0,2 ppm 15 minuutin altistusaikana (Aalto 2009). Kuitenkaan Suomen sisäilmastoissa ei yleensä esiinny normaaliolosuhteissa niin korkeita otsonin pitoisuuksia, että niistä muodostuisi suurempia terveysriskejä, poissulkien työpaikat, joissa lukuiset työkonet tuottavat jatkuvia valokemiallisia reaktioita.

4 Sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin vaikuttavat rakennusfysikaaliset tekijät

Rakennuksen sisäilman laatuun vaikuttavat muun muassa ilmanvaihtoratkaisut, rakennuksen sijainti, rakennustapa, rakennusmateriaalit ja rakennuksen käyttö sekä ympäröivistä fysikaalisista olosuhteista sääolot ja vallitseva ulkoilman laatu. Ympäröiviin olosuhteisiin, kuten ulkoilman lämpötilaan, sademääriin ja hiukkasten konsentraatioon, ei pystytä vaikuttamaan, mutta erilaisilla rakennusfysikaalisilla ratkaisuilla ja taloteknisillä toiminnoilla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka sisäilma reagoi ympäröiviin olosuhteisiin ja kuinka ulkoilman epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan voidaan rajoittaa sekä sisäilman epäpuhtauksien esiintymistä vähentää.

Viimeaikaiset tutkimukset ovat vahvistaneet käsitystä, jossa materiaalien kyky sitoa tai vapauttaa erilaisia VOC-yhdisteitä ei riipu ainoastaan materiaalin sisäisestä koostumuksesta ja kemiallisesta rakenteesta, vaan myös ulkoisista tekijöistä kuten paineen, kosteuden, lämpötilan ja materiaalia ympäröivän ilman kemiallinen koostumus sekä yhdisteiden molekyylien polarisaatio. (Deng, Yang ym. 2012) Sisäilman tutkimuksissa on sisätilan VOC-tasoa tutkittaessa painotettu ja vertailtu sisäilman fysikaalisia olosuhteita tulosten tarkasteluiden yhteydessä, kuten lämpötilaa ja kosteutta, mutta ulkoilman tila on jäänyt liian usein huomiotta. Sisä- ja ulkoilman väliset rakenteet ovat aina kontaktissa sisäilman lisäksi myös ulkoilmaan, jossa olosuhteet voivat muuttua erittäin radikaalisti jopa vuorokauden sisällä.

Crump ym. (1997) mittasivat tutkimuksessaan juuri valmistuneiden rakennusten TVOC-pitoisuuksia ja havaitsivat merkittäviä eroja sisäilman konsentraatiossa ajan suhteen. Neljästä vastavalmistuneesta asuintalosta mitattiin TVOC-pitoisuudet, jotka suurimmillaan saavuttivat konsentraation $9700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ensimmäisen puolen vuoden aikana. Yhden vuoden jälkeen TVOC-arvot olivat lähellä $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja 18 kuukauden jälkeen pitoisuudet asettuivat lähelle arvoa $200 \dots 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kun ilmanvaihtolukua pidettiin vakiotasolla, $0,5 \text{ h}^{-1}$ kaikissa kohteissa. (Crump, Squire ym. 1997)

Eräässä tutkimuksessa seurattiin toimistorakennuksen TVOC-tasoa rakennuksen valmistumisen jälkeen, kun toimistorakennuksen ilmanvaihto oli toteutettu luonnollisena ilmanvaihtona. Kyseisessä tutkimuksessa TVOC-pitoisuus oli heti rakennuksen valmistumisen jälkeen yli $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja 8 kuukautta valmistumisesta enää $200 \dots 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Saman tutkimuksen toisessa koesarjassa koneellisen ilmanvaihdon omaavassa toimistossa kului aikaa 12 kuukautta, TVOC-pitoisuuden vähenemiseen arvosta $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ arvoon $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Työryhmän tulokset toivat esille ilmanvaihdon merkityksen hyvän sisäilman laadun saavuttamiseksi ja ilmanvaihdon merkitystä vastavalmistuneen rakennuksen VOC-emissioiden asettumisessa hyväksyttävälle tasolle, sekä rakennusaineiden merkitystä korkeissa sisäilman TVOC-pitoisuuksissa ensimmäisen kuuden kuukauden aikana. Toimistorakennuksissa esiintyvistä VOC:eista 10 dominoivinta yhdistettä pystyttiin yhdistämään tiettyihin materiaalivalintoihin. Käsitelty puutavara, kuten eräät pinnoitetut tai liima-aineita sisältävät puutuotteet sekä maalit, matot, eristeaineet ja liimat olivat tärkeimmät lähteet alkuvaiheen korkeille TVOC-pitoisuuksille. Kyseiset tutkimukset toivat esille myös sen, että ilmanvaihdon toteutusmuoto ei takaa parempaa sisäilman laatua, mikäli ilmanvaihtoratkaisun soveltuvuus ei ole sopiva rakenneratkaisujen kannalta. (Yu, Kim 2010)

Ihmisen terveydelle haitallisten kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden lähteen paikantaminen sisätilan mikroilmastosta on erittäin tärkeää haitta-aineen pitoisuuden vähentämiseksi sisäilmassa ja myöskin ainoa lähestymistapa haitta-aineen emissioiden vähentämiseksi korjauskeinoin (Edwards, Jurvelin ym. 2001). Tämän lisäksi haitallisten aineiden lähteen tai lähteiden selkeä paikantaminen antaa mahdollisuuden priorisoida merkittävimpien haitta-aineiden syiden korjaamista, sekä mahdollistaa kustannustehokkaiden korjaustoimenpiteiden suorittamista, kun korjaus pystytään kohdentaa ja suorittaa täsmällisemmin niihin osiin, joiden vaikutukset sisäilman laatuun ovat merkittävimmät.

Joskus sisäilman epäpuhtaudet saattavat johtua myös rakennuksen tai sen osan käyttötarkoituksen muuttumisesta. Käyttötarkoituksen muuttuessa rakennus ei palvelekaan käyttäjiä suunnitellusti. Esimerkiksi jos toimistoksi tai asuinympäristöksi suunniteltua rakennusta aletaan käyttää laboratoriona tai jos laboratoriotilaa aletaankin käyttää toimisto- tai asuintilana, ei suunnittelu välttämättä tue käyttöä. Rakennusta tulisi käyttää siihen tarkoitukseen johon se alun perin on suunniteltu. (Salonen, Lappalainen ym. 2011b) Toisaalta, jos rakennuksen käyttötarkoitusta muutetaan olosuhteiden pakosta tai esimerkiksi kannattavuuteen liittyvistä tekijöistä johtuen, olisi syytä tutkia perusteellisesti, mitkä muutokset on mahdollista toteuttaa laadukkaan sisäilman saavuttamiseksi uutta käyttötarkoitusta ajatellen. Mikäli uuden käyttötarkoituksen vaatimuksiin edellytetään jokin sitä vastaava sisäilman laatu, on sen saavuttamiseksi tehtävä tarpeenmukaiset toimenpiteet. Esimerkiksi jonkin rakennuksen muuttaminen ihmiselle asumiskelpoiseksi, saattaisi vaatia muun muassa uudet ilmanvaihtojärjestelmät ja muut talotekniset laiteasennukset, lämmöneristysratkaisut, sisätilan materiaalit, uuden julkisivun ja vesikatteen sekä akustiset rakenneratkaisut. Tällöin on syytä huomata ne tekijät jotka saattavat vaikuttaa sisäilman laatuun, kuten rakennuksen ja eri rakenneosien kosteustekninen käyttäytyminen.

Ymmärrys tutkittavien tilojen ja huoneiden sisäilman yhdisteiden koostumuksista ja pitoisuuksista voi olla suureksi hyödyksi jäljitettäessä epäpuhtauslähdettä. Tämän lisäksi ajallinen vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuden määrään on hyvä huomioida. Tarkasteltaessa sisäilman laatua eri vuorokauden-, viikon- tai vuodenaikana, saattaa sisäilman epäpuhtauspitoisuudet ja kemialliset yhdisteet muuttua jopa merkittävästi eri ajankohtina. (Bornehag 1996) Jos lisäksi pystytään kirjaamaan käyttäjien oireet ajan suhteen ja sitä kautta vertaamalla mitattuihin arvoihin voi näistä tiedoista löytyä yhteyksiä rakennuksen käyttäjän ärsytysoireiden ja havaittujen ainepitoisuuksien välille.

4.1 Rakennus- ja sisustusmateriaalit

Vähäemissioiset rakennus- ja sisustusmateriaalit ja niiden oikea käyttö ovat yksi hyvänlaatuisen ja miellyttävän sisäilman perustekijöistä. (Villberg, Saarela ym. 2004). Rakenteissa ja muissa rakennus- ja sisustusmateriaaleissa tapahtuva emissio on haihtumisilmiö, jossa materiaalin kemialliset yhdisteet muuttuvat kaasumaisiksi yhdisteiksi ja tämä voi oleellisesti heikentää sisäilman laatua, mikäli haihtuminen tapahtuu materiaalin pinnalla ja vapautuvat emissiot kulkeutuvat sisäilmaan. Materiaaliemission voimakkuus on riippuvainen materiaalissa olevista kemiallisista yhdisteistä, sekä materiaaliin vaikuttavista lämpö- ja kosteusolosuhteista, ilman liikkeestä sekä haihtuvan yhdisteen diffuusiokertoimesta (Wolkoff 1998). Uudelle rakennusmateriaalille ominaista emissiota kutsutaan primaariemissioksi tai ominaisemissioksi, joka voidaan ilmoittaa massayksikkönä pintala- ja aikayksikköä kohden eli $\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$ ($1000 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) (Järnström, Saarela 2005).

Yli puolet sisäilman VOC:eista arvioidaan olevan peräisin rakennusmateriaaleista (Rundt, Backlund ym. 2005). Uusissa tai vastakorjatuissa rakennuksissa rakennusmateriaalien primaariemissiot ovat yleensä suurimmillaan mutta vähenevät voimakkaasti muutamien kuukausien kuluessa ja yleensä kahden vuoden kuluessa TVOC-taso sisäilmassa on lopullisesti vakiintunut uudiskohteissa (Järnström, Saarela 2005, Salonen, Lappalainen ym. 2011a). Tunnusomainen "uutuuden" haju on yleensä helposti aistittavissa uudiskohteiden asunnoissa ja tavallisesti noin puolen vuoden kuluttua rakennuksen valmistamisesta primaariemissiot ovat tasolla, josta ei enää pitäisi olla sisäilman kannalta haittaa (Rundt, Backlund ym. 2005). Uusissa ja remontoituissa rakennuksissa, joissa on käytetty uusia rakennusmateriaaleja, saattaa esiintyä 10 – 100 kertaa korkeammat sisäilman VOC-tasot kuin vanhemmissa rakennuksissa (Salonen, Lappalainen ym. 2011a). Materiaaliemissiot eivät ole ainoastaan uusien rakennusten ongelma, koska pidempiaikaisen materiaalin vanhenemisprosessi ja vaurio, kuten kastuminen voi myös aiheuttaa kemikaalien vapautumista sisäilmaan ja niin kutsuttua sekundaariemissioita.

Kaasumaisia orgaanisia yhdisteitä sisäilmassa on tutkittu paljon, mutta erilaisten materiaalien akuuttia vaikutusta sisäilman ainepitoisuuksiin ei ole yhtä tarkasti tutkittu, vaikka yleisesti tiedetään VOC-tason olevan sisäilmassa ulkoilmaa korkeampi pääosin rakennus- ja sisustusmateriaaleista johtuen. Tutkimusten painottuminen sisäilmaan rakennusmateriaalien sijaan johtuu muun muassa siitä, ettei kaikkien materiaalien toimintamekanismeja tunneta ja selkeä standardointi sekä yleisesti asetettujen materiaalien emissiomäärien toteaminen on puutteellista. Lisäksi eri materiaalit toimivat ajan ja vallitsevan fysikaalisen olotilan suhteen vaihtelevasti eikä ole riittävästi tietoa, miten mikäkin materiaali käyttäytyy elinkaarensa eri hetkinä. Nykyisin materiaalien emissiotutkimukset ovat kuitenkin lisääntyneet ja tietoa saadaan koko ajan lisää. (Deng, Yang ym. 2012)

Sisustus- ja rakennusmateriaaleille voi olla ominaista, että niiden haihduttamat emissiot muuttuvat kemialliselta koostumukseltaan ajan kuluessa. Tämä tarkoittaa sitä, että uuden materiaalin haihduttamat primaariemissiot ja sekundaariemissiot sisältävät eri yhdisteitä eri hajoamisprosesseista johtuen ja näin ollen näiden emissioiden ajallinen kehitys on toisistaan poikkeavaa. Primaariemissioille on tyypillistä, että ne pienenevät ajan funktiona suhteellisen nopeasti, mikä pätee erityisesti alhaisen kiehumispisteen omaaviin liuotinyhdisteisiin uusissa rakennusmateriaaleissa. Sekundaariemissiot ovat ajallisesti tarkasteltuna pitkäkestoisempia prosesseja, joiden emissioprofiili on melko tasainen ajan funktiona ja hajoamisprosessissa vapautuvan emission ajallinen kesto saattaa olla jopa useita vuosia. (Järnström, Saarela 2005) Materiaaleissa tapahtuu kemiallisten ja fysikaalisten tekijöiden aiheuttamia muutoksia, jotka voivat synnyttää mahdollisesti jatkuvaakin, sekundaarista emissiota. Näitä materiaalien hajoamista edistäviä tekijöitä ovat esim. kosteus, otsoni, kuumuus, UV-valo, huoltotoimet tai muu kuluminen. Sekundaariemissio on tavallisesti määrältään kuitenkin huomattavasti rakennusmateriaalien primaaripäästöjä vähäisempää (Rundt, Backlund ym. 2005). Wolkoff analysoi tutkimuksessaan PVC-muovimattojen emissioita ja huomasi muun muassa, että voimakkaammat ilmanliikkeet saattoivat lisätä sekundaariemissioiden hapettumistuotteiden esiintymistä, minkä lisäksi korkeampi typpi- ja kosteuspitoisuus lisäsivät muun muassa rakennusmateriaalien notkistinaaineiden hajoamisprosessin kehittymistä sekundaariemissioiden osalta, kun taas primaariemissioita tutkittaessa muun muassa typen vaikutukset emissioihin olivat vähäisemmät (Wolkoff 1998).

Rakennusmateriaaleista lattiapäällysteet laajoina pintoina käytettyinä ovat olleet erityisen huomion kohteena mahdollisten VOC-emissioiden lähteinä. Taulukossa 9 on esitetty erilaisista lattiapinnoitteista ja muista materiaaleista mitattuja emissioita. Erityisesti PVC:stä

eli polyvinyylikloridi-muovista valmistettujen muovimattojen ja linoleumin emissiotuotteiden on todettu aiheuttavan sisäilmaan epämiellyttävää hajua. Myös muovimateriaalit voivat vaurioitua kulutuksen, lämmön, kosteuden tai mikrobin aiheuttaman hajoamisen seurauksena, jolloin muodostuu erilaisia hajoamistuotteita sekundaariemissiona. PVC-muovin ja sen pehmittimenä yleisesti käytetyn dietyyliheksyyliiftalaatin (DEHP) hajoamistuotteen tavallinen emissioyhdiste on 2-etyyli-1-heksanoli, jolla on tunnusomainen kitkerän-makea haju. Muoveista vapautuvien VOC-yhdisteiden on todettu hajuhaittojen ohella aiheuttavan hengitysteiden ja silmien ärsytysoireita. Arvioiden mukaan jotkut näistä tekijöistä voivat olla synnyttämässä tai ainakin pahentamassa astmaoireita. (Rundt, Backlund ym. 2005)

Taulukko 9. Tyypillisiä sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästölähteitä (Rundt, Backlund ym. 2005)

Yhdisteryhmä: yhdisteitä	Mahdollisia päästölähteitä
aldehydit: pentanaali, heksanaali, heptanaali, oktanaali, nonanaali	puurakenteet, lastulevy, tapetit, lattiavahat, hajusteet, linoleum, kostea mineraalivilla
bentsaldehydi	pakokaasut, lastu- ja kuitulevyt
alifaattiset ja sykliiset hiilivedyt: heksaani, heptaani, oktaani, sykloheksaani, metyyli sykloheksaani	liimat, bensiini, pakokaasut, liuottimet, polyuretaani
nonaani, dekaani, un-, do-, tri-, tetra-, penta- ja heksadekaani	pakokaasut, polttoöljy, dieselöljy
C4-C5-hiilivedyt: butaanit, pentaanit	kylmä-, ponne- ja vaahdotusaineet, nestekaasu(butaani), polyuretaani
alkoholit: propanolit, butanolit, pentanolit	liuottimet, puhdistusaineet, maalit
aromaattiset hiilivedyt: etyylibentseeni, ksyleenit, trimetylibentseenit, tolueeni	maalit, lakat, liimat, pakokaasut, bensiini, liuottimet, seinäpinnoitteet, polyuretaani, puhdistusaineet
bentseeni	bensiini, pakokaasut, tupakka
styreeni	polyesteri(lujitemuovi)hartsit, kumimatot
glykolit: 1-metoksi-2-propanoli, 1-etoksi-2-propanoli	vesiohenteiset maalit, lakat
1,2-propaanidioli, 2-(2-etoksietoksi)etanoli	korkkilaatat
klooratut hiilivedyt: tri- ja tetrakloorieteeni, 1,1,1-trikloorietaani	liuottimet, kuivapesuaineet, liimat
siloksaanit : mm. dekametyyli syklopentasiloksaani	saumausaineet, kosteuseristeet, tekstiilien hyljintäpinnoitteet
terpeenit: alfa- ja beeta-pineeni, 3-kareeni, limoneeni	puumateriaalit, hajusteet, puhdistusaineet, maalit, liuottimet
muut: TXIB, 2-etyyliheksanoli	muovimatot
1,4-diklooribentseeni	deodorantit, koimyrkyt, ilmanraikasteet

Viimeisten vuosien ja vuosikymmenien aikana tehdyt lukuisat tutkimukset, koskien kaa-sumaisia orgaanisia yhdisteitä, ovat edesauttaneet lukuisien kansallisten ja kansainvälis-ten merkintä- ja luokitusjärjestelmien kehittymistä, sekä tiettyjen standardien ja ohjeiden esiintuloa. Tämän seurauksena on alettu kehittää vähemmän VOC emissioita tuottavia rakennusmateriaaleja ja tuotteita. Kaikesta huolimatta, positiivisten seurausten todenta-misessa on yhä haasteita liittyen vähäemissioisiin materiaaleihin. Tarpeeksi kattavaa do-kumentointia ei ole saatavilla emissioiden vähenemisestä ajan suhteen, minkä lisäksi laa-jaa ja pitkäkestoista seuranta ja mittaus ei ole tehty tarpeeksi kohteissa, missä on käy-tetty uusia vähäemissioisiksi todettuja materiaaleja. Näin ollen ajan vaikutus on jäänyt liian usein huomioimatta, eikä ole täysin varmaa pysyvätkö jonkin materiaalin emissiot alhaisina läpi pitkien tarkastelujaksojen. (Wolkoff, Wilkins ym. 2006)

Nykypäivän rakennusten sisäilman laadun suunnittelussa, missä rakenteet ovat tiiviimpiä ja energiatehokkaampia, olisi hyödyllistä kiinnittää enemmän huomiota rakennusmateri-aalien VOC-emissioihin ja niiden terveysvaikutuksiin sisäilmassa. Usein yritetään vähen-tää sisäilman haitallisten aineiden määrää muilla välillisillä menetelmillä, jotka eivät kui-tenkaan aina vähennä haitallisen aineen tuottamaa epäpuhtautta. Epäpuhtauslähteiden ominaispiirteet ovat monimutkaisia ja vielä nykypäivänä on ei täysin ymmärrettä VOC-emissioiden syntymekanismeista rakennuksen sisäilmassa. Sisäilmassa tapahtuvat kemi-alliset reaktiot voivat olla erittäin monimutkaisia ja eri reaktioiden yhteisvaikutuksia, sekä eri tilanteiden sekundaarisia reaktioita ei täysin vielä tunneta. Rakenteissa tapahtuvat re-aktiot ja rakenteiden pinnoilla tapahtuvat ilmiöt sekä sisä- ja ulkoilman fysikaalisten olo-suhteiden muutokset tekevät tutkimuksista ja tulosten analysoinnista erittäin haastavaa. (Liu, Ye ym. 2013)

4.1.1 Rakennusmateriaalien päästöluokitus

Rakennusmateriaaleista maahantuoja ja valmistaja voivat halutessaan hakea tuotteilleen päästöluokitusta, jonka myöntää Rakennustietosäätiö RTS. Luokitustoiminta on vapaa-ehtoista, eikä perustu viranomaismääräyksiin (Vinha 2014). Luokituksessa asetetaan vaa-timuksia materiaaleista huoneilmaan kulkeutuville kemiallisille päästöille eli emissioille neljän viikon iässä testattuina (Rundt, Backlund ym. 2005). Tutkittavia ominaisuuksia ovat TVOC:n, formaldehydin, ammoniakkin ja karsinogeenisten aineiden emissiot sekä haju (Sisäilmayhdistys 2008).

Rakennusmateriaalien päästöluokitus sisältyy Rakennustietosäätiön ja Sisäilmayhdistyk-sen laatimaan Sisäilmaluokitus 2008-asiakirjaan, jossa on myös esitetty sisäilman tavoit-tearvoja koskien lämpöoloja, äänitasoa, ilmanvaihtoa ja ilman epäpuhtauksia. Rakennus-ja sisustusmateriaaleista vapautuu huoneilmaan erilaisia kemikaaleja. Ne voivat olla pe-räisin muun muassa käytetyistä raaka-aineista, valmistusprosessin virheistä tai materiaa-lien vanhenemisestä tai ne voivat aiheutua materiaalien väärästä käytöstä. Rakennusma-teriaalien päästöluokitus esittää vaatimukset tavanomaisissa työ- ja asuintiloissa käytet-täville materiaaleille hyvän sisäilman laadun saavuttamiseksi. Tavoitteena on käyttää vä-häpäästöisiä tuotteita, etteivät materiaalit lisää ilmanvaihdon tarvetta. (Sisäilmayhdistys 2008)

Sisäilmastoluokituksessa materiaalien päästöluokitus on kolmiportainen siten, että luokka M1 on paras ja luokka M3 eniten epäpuhtauspäästöjä synnyttävä. Luokkaan M1 kuuluvat emissiotestatut materiaalit, joiden päästöt täyttävät taulukon 10 vaatimukset. Luokkaan M2 kuuluvat emissiotestatut materiaalit, joiden päästöt täyttävät taulukon 11

vaatimukset. Luokkaan M3 kuuluvat materiaalit, joiden päästöt ylittävät luokan M2 vaatimukset. Testaamattomille materiaaleille ei myönnetä luokitusmerkkiä. (Sisäilmayhdistys 2008)

Taulukko 10. Luokan M1 vaatimukset rakennusmateriaaleille (Sisäilmayhdistys 2008).

- Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaisemissio (TVOC) on alle 0,2 mg/m²h. Yhdisteistä on tunnistettava vähintään 70 %.
- Formaldehydin (H₂CO) emissio on alle 0,05 mg/m²h.
- Ammoniakin (NH₃) emissio on alle 0,03 mg/m²h.
- IARC:n luokittelun mukaisten luokkaan 1 kuuluvien karsinogeenisten aineiden (WHO 1987) emissio on alle 0,005 mg/m²h (ei koske formaldehydiä, sen kriteeri on annettu edellä).
- Materiaali ei haise, hajun hyväksyttävyys kouluttamattomalla paneelilla arvioituna on >0,1.
- Laastit, tasoitteet ja silotteet eivät saa sisältää kaseiinia.

Sisäilmastoluokituksen mukaan sisätiloja suunniteltaessa voidaan M1-luokan tuotteisiin myös rinnastaa pinnoittamattomina tiili, luonnonkivi, keraaminen laatta, lasi, metalli sekä käsittelemättömästä puusta (poissulkien kovapuulajit) valmistetut laudat ja hirret, joiden VOC-päästöt voivat kuitenkin olla tuoreena luokan M1 raja-arvoja suuremmat (Vinha 2014).

Taulukko 11. Luokan M2 vaatimukset rakennusmateriaaleille (Sisäilmayhdistys 2008).

- Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaisemissio (TVOC) on alle 0,4 mg/m²h. Yhdisteistä on tunnistettava vähintään 70 %.
- Formaldehydin (H₂CO) emissio on alle 0,125 mg/m²h.
- Ammoniakin (NH₃) emissio on alle 0,06 mg/m²h.
- IARC:n luokittelun mukaisten luokkaan 1 kuuluvien karsinogeenisten aineiden (WHO 1987) emissio on alle 0,005 mg/m²h (ei koske formaldehydiä, sen kriteeri on annettu edellä).
- Materiaali ei haise hajun hyväksyttävyys kouluttamattomalla paneelilla arvioituna on 0,1.
- Laastit, tasoitteet ja silotteet eivät saa sisältää kaseiinia.

Materiaaliyhdistelmän päästöluokka määräytyy siinä käytetyn huonoimman materiaalin mukaan. Esimerkiksi luokan M1 pinnoitteella pinnoitettu luokan M2 materiaali kuuluu luokkaan M2, kunnes pinnoitetun tuotteen emissiomittauksilla on toisin osoitettu. Vastaavasti luokan M2 pinnoitteella pinnoitettu luokan M1 tuote kuuluu luokkaan M2, kunnes pinnoitetun tuotteen emissiomittauksilla on toisin osoitettu.

4.2 Ilmanvaihto ja sisäilman hiilidioksidin taso

Toimivat ja tehokkaat ilmanvaihto- ja ilmastointiratkaisut ovat hyvän sisäilman laadun perusta. Ilmanvaihdon tarkoituksena on poistaa sisätilojen ja oleskelutilojen sisäilmasta epäpuhtauksia, kosteutta ja liiallista lämpöä sekä samalla huolehtia puhtaan korvausilman saannista. Sisäilman epäpuhtaudet ovat yleensä peräisin ihmisten aineenvaihdunnasta, asumisen erilaisista toiminnoista, rakennus- ja sisustusmateriaaleista, ulkoilmasta ja eräissä tapauksissa, kuten radonin kulkeutuminen, on haitta-aine peräisin maaperästä. Ilmanvaihto on yleisesti ottaen tyypillisin tapa kontrolloida sisäilman laatua kuljettamalla ulkoilmaa sisälle ja poistaen niin kutsuttua likaista sisäilmaa poistoilman avulla. Sisäilman haitallisen aineen aiheuttamaa kuormaa hallittaessa tärkein ja helpoin akuutti puhdistuskeino on ilmanvaihto, kun haitta-ainelähde on rakennuksen sisällä. (Bluyssen 2013,

Sundell, Levin ym. 2011, Ye, Won ym. 2014) On kuitenkin hyvä muistaa, ettei ilmanvaihto välttämättä edesauta itse haitta-ainelähteen tai muun viihtyvyyttä alentavan tekijän poistamiseen kauttaaltaan, vaan toimii enemmänkin eräänlaisena puhdistuksen kaltaisena mekanismina.

Samaan aikaan, kun ulkoilman saasteiden määrää pyritään alentamaan ja energian säästämiseksi rakennusten ilmanvaihtuvuutta pienennetään, nousevat sisäilman laatutekijät ja haitallisten aineiden sisäiset lähteet yhä tärkeämpään rooliin tarkasteltaessa ihmisten altistumista ympäröivän ilman kanssa (Logue, Mckone ym. 2011). Sisäilman hiilidioksidipitoisuus on suurelta osin peräisin ulkoilmasta, missä ulkoilman keskimääräinen hiilidioksidipitoisuus on tyypillisesti noin 350 – 450 ppm, mutta sisäilmassa, jossa rakennuksen sisäinen tuotto on suuri, hiilidioksidin pitoisuus voi nousta moninkertaiseksi ulkoilmaan nähden, jolloin ulkoa tulevan hiilidioksidin osuus jää vähäisemmäksi. Sisäilmassa normaalitilanteessa tärkein hiilidioksidin lähde on ihminen, jonka hengityksen mukana vapautuu hiilidioksidia, minkä lisäksi hiilidioksidia voi vapautua joistakin muistakin lähteistä kuten kynttilöistä, kaasuliesistä tai tupakanpolton yhteydessä (Seppänen 2004).

Sisäilman hiilidioksidin tasoa voidaan pitää luotettavana indikaattorina ilmanvaihdon riittävyyttä arvioitaessa, sillä hiilidioksidin sekoittuminen sisäilmaan tapahtuu melko nopeasti ja tasaisesti, eikä varsinaista kerrostumista ilmenny kuten joidenkin kuitujen tai hiukkasten konsentraatioissa voi tapahtua. CO₂-pitoisuus saattaa kohota sisäilmassa korkeaksi esimerkiksi asuinhuoneiston makuuhuoneessa yön aikana, koulun luokahuoneissa oppitunnin aikana ja päiväkodin lepohuoneessa, jolloin sisäilma alkaa tuntua tunkkaiselta ja voi joissain tapauksissa aiheuttaa väsymystä, päänsärkyä tai työskentelytehon huononemista (STM 2008). Koska hengityksen ja ihon kautta vapautuvien epäpuhtauksien määrä on likimain verrannollinen hiilidioksidin tuottoon, minkä lisäksi hiilidioksiditaso on melko lailla verrannollinen ilmanvaihtuvuuteen, voidaan hiilidioksidia käyttää kuvaamaan ilman laatua, vaikka hiilidioksidin pitoisuus sellaisenaan ei olisikaan haitallisen korkea (Seppänen 2004). Hiilidioksidi-pitoisuus kertoo ilmanvaihtuvuudesta ja sitä kautta voidaan arvioida onko ilmanvaihdon taso riittävä. Epästationaaritilassa hiilidioksidipitoisuus noudattaa ajasta riippuvana kaavaa 9 (Seppänen 2004):

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + C_\infty (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (9)$$

$C(t)$ = ajasta t riippuva hiilidioksidipitoisuus

C_0 = hiilidioksidipitoisuus huoneessa ajanhetkellä $t = 0$

C_∞ = hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa

t = aika, h

τ = ilmanvaihdon aikavakio, $1/h$ ($= 1/n$)

n = ilmanvaihtokerroin (q/V)

q = ilmanvaihdon suuruus, m³/h

V = huoneen tilavuus, m³

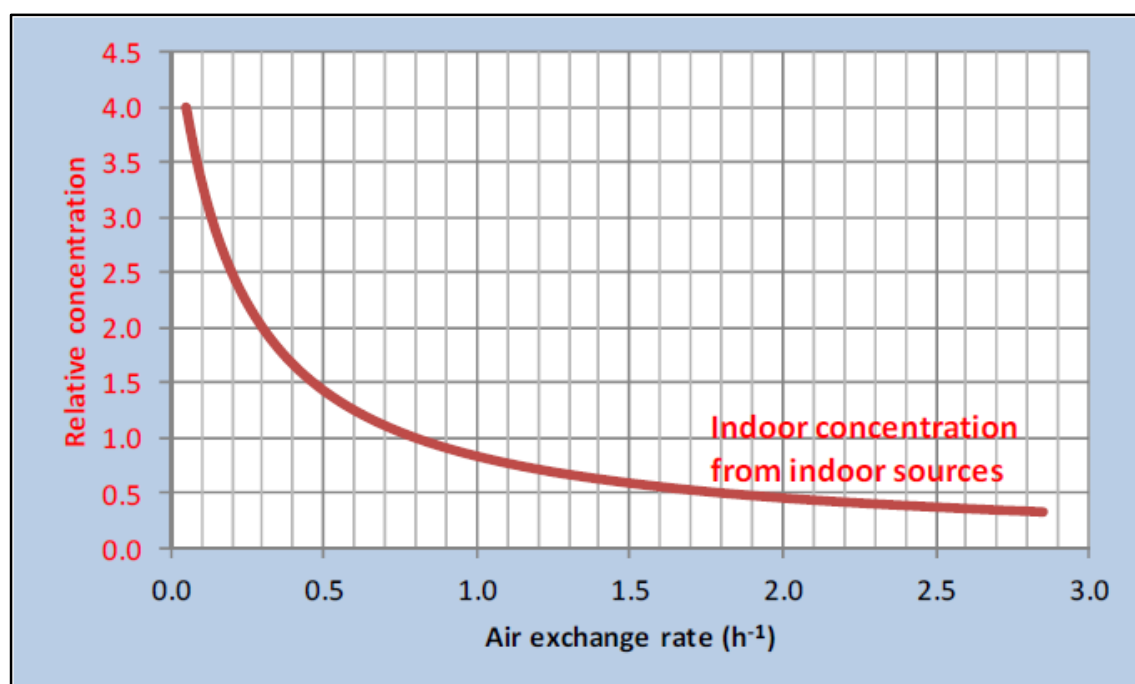
Tutkittaessa sisäilman hiilidioksidin tasoa ja ilmanvaihtuvuutta joudutaan usein tekemään mittauksia jollakin aika-askeleella, jolloin kaavaa 9 voidaan muokata sellaiseen muotoon, että mittaustuloksista saadaan helpommin tarpeellista informaatiota. Tämän diplomityön

kenttäkokeissa mitatut hiilidioksidin, sekä useiden muiden sisäilman epäpuhtauksien pitoisuustasot, mitattiin minuutin sykleissä ja mittaustulosten arvioinnissa käytettiin hyväksi kaavaa 10, tässä tapauksessa hiilidioksidin tasoa mitattaessa:

$$C_{N+1} = \frac{q_{CO_2}}{nV} (1 - e^{-n\Delta t}) + (C_N - C_\infty)e^{-n\Delta t} + C_\infty \quad (10)$$

q_{CO_2} = huoneessa tapahtuva hiilidioksidin tuotto

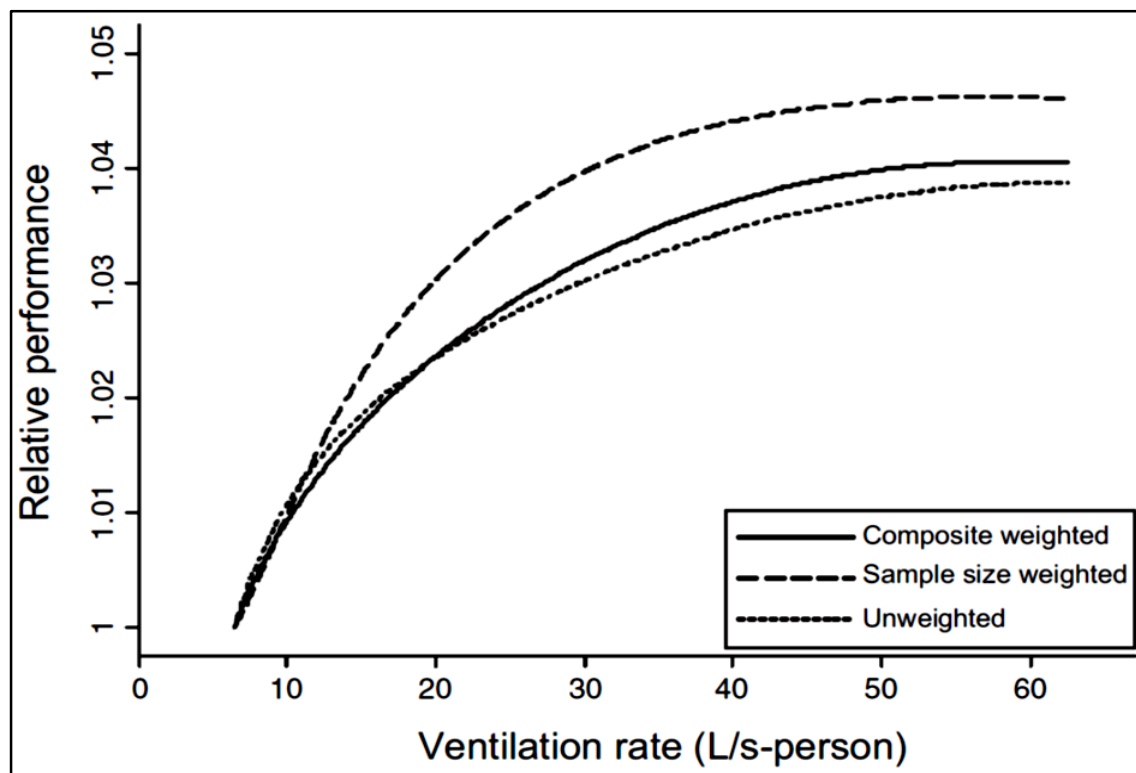
Kyseisestä kaavasta voidaan ennakoida tulevaa hiilidioksidin tasoa, mikäli hiilidioksidin tuotto tiedetään. Sitä vastoin huoneen ollessa tyhjä on helppoa arvioida hiilidioksidin tasoa eri ajan hetkinä kun hiilidioksidin tuotto oletetaan mitättömäksi, vaikka pieniä määriä saattaa emittoitua rakenteista, joihin hiilidioksidi on kontaminoitunut. Hiilidioksidin tason ollessa laskeva ja mitattavissa, voidaan arvioida hyvällä tarkkuudella myös huoneen ilmanvaihtuvuutta sikäli, kun huoneilman sekoittuminen kaasuseosten osalta oletetaan täydelliseksi ja huoneen sisällä ei ole paikallisia eroja hiilidioksidipitoisuuksissa. Kuvassa 11 nähdään, kuinka ilmanvaihdon teho vaikuttaa sisäilman ainepitoisuuksien konsentraatioon, kun aineen lähde on rakennuksen sisällä. Kuvassa ei ole ainepitoisuuksien kannalta absoluuttisia arvoja vaan kysymyksessä on suhteellisen ainepitoisuuden arvo.



Kuva 11. Suhteellinen sisäilman konsentraatio ja ilmanvaihtuvuuden merkitys epäpuhtauslähteen ollessa sisätiloissa (Hänninen, Asikainen)

Usein puhutaan joidenkin epäpuhtauspitoisuuksien haittavaikutuksista työntekijöiden tehokkuuteen tai yleisesti terveyteen, mutta monesti ei tiedetä tarkkaa mekanismia, millä jotkut haitta-aineet vaikuttavat ihmiseen vaikka selkeitä korrelaatioita ilmeneekin oireiluiden ja epäpuhtauspitoisuuksien välillä. Jos kuitenkin pystytään parantamaan ilmanvaihdon tasoa ja määrää on perusteltua olettaa, että se vaikuttaa sisäilman laatuun ilmanvaihdon niin sanotusti puhdistessa sisäilmaa kuten kuvassa 11 asia on esitetty. Seppänen, Fisk ja Lei (2006) analysoivat työntekijöiden työtehokkuuden ja toimiston ilmanvaihdon määrän välistä suhdetta. Heidän tutkimuksissaan ilmeni lähes poikkeuksetta työtehokkuuden paranemista ilmanvaihdon määrää lisättäessä. Kokeissa työtehokkuus parani 1...3 % jokaista 10 lisättyä litraa tuloilmaa henkilöä kohden ja työtehokkuus parani eniten ilmanvaihdon ollessa alkuhetkellä alle 20 l/s/henkilö. Kuva 12 selvittää tutkimuksessa

havaitun työtehokkuuden ja ilmanvaihdon tason välistä suhdetta (Seppänen, Fisk ym. 2006).



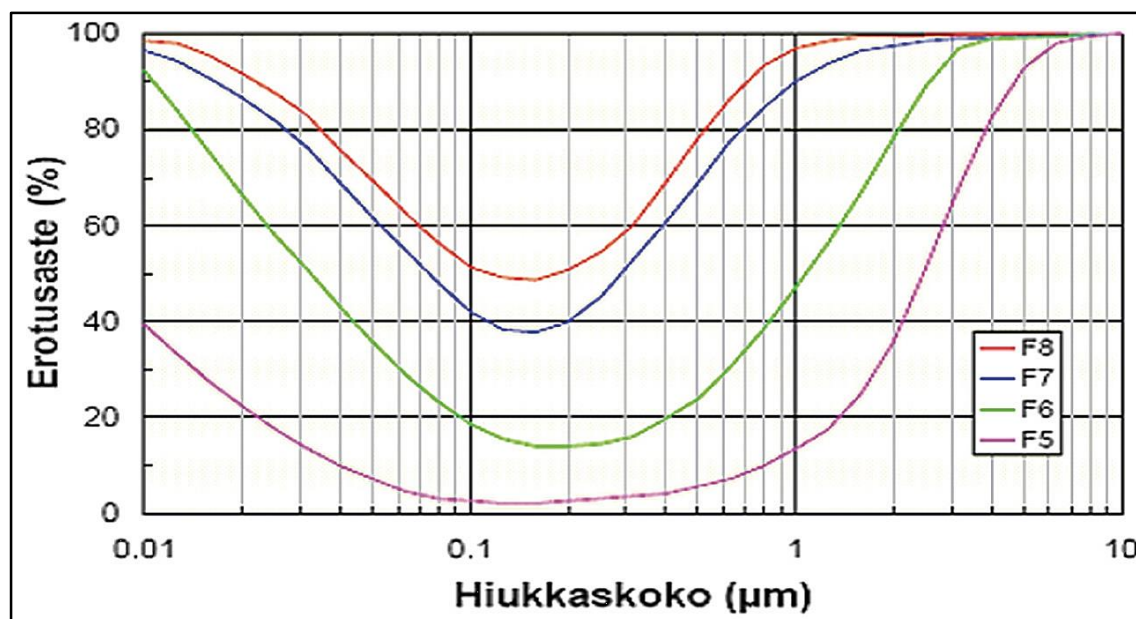
Kuva 12. Työtehokkuuden ja ilmanvaihdon määrän välinen yhteys (Seppänen, Fisk ym. 2006).

Varsinkin uudiskohteissa ilmanvaihtojärjestelmällä on suuri vaikutus sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Useissa asunnoissa on mitattu selvästi alhaisempia TVOC-tasoja, kun tutkittavassa tilassa on ollut koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä, verrattuna rakennuksiin, joissa on ainoastaan koneellinen poistoilmajärjestelmä. Eräässä VTT:n teettämässä tutkimuksessa havaittiin TVOC-pitoisuuksien pienentyvän jopa 60 % neljässä viikossa, kun ilmanvaihdon määrää kaksinkertaistettiin. (Järnström, Saarela 2005) Kyseisessä tutkimuksessa ilmanvaihdon korkeampi tehotaso vaikutti todennäköisesti myös rakennusmateriaaleihin sitoutuneiden kemiallisten epäpuhtauksien huuhtoutumiseen, eikä pelkästään sisäilmassa tapahtuviin reaktioihin.

Deng, Yang ym. selvittivät tutkimuksissaan ilmanvaihdon merkitystä rakennusmateriaalien emissioihin ja sorptioihin. Tutkimuksessa suoritetuissa simulaatioista ja kokeista saatiin luotua johtopäätökset, joissa todettiin ilmanvaihdolla olevan erittäin suuri merkitys. Ilmanvaihdon ollessa alhainen kaasumaiset ja kemialliset yhdisteet sitoutuivat helposti korkean sorptiokyvyn omaaviin materiaaleihin, kuten tyyny ja matot ja päinvastoin ilmanvaihdon tason kasvaessa yhdisteet eivät sitoutuneet yhtä helposti edellä mainittuihin materiaaleihin. (Deng, Yang ym. 2012)

Jotkut tutkijat ovat sitä mieltä, että dominoivimman haitta-aineen identifiointi ja kontrollointi ilmanvaihdon avulla olisi tehokas tapa minimoida haitallisten aineiden määriä sisäilmassa (Fang, Zhang ym. 2006, Daisey, Angell ym. 2003). Mikäli dominoivan sisäilman haitta-aineen lähde on sama kuin muiden haitallisten aineiden lähde, on perusteltua olettaa, että mittaamalla, kontrolloimalla ja alentamalla dominoivan haitta-aineen pitoisuutta, on mahdollista alentaa myös muiden haitallisten aineiden pitoisuuksia.

Tulo- ja poistoilmanvaihdoilla toteutetulla ilmastoinnilla tuloilman suodatuksella on oleellinen merkitys muun muassa sisäilman hiukkaspitoisuuteen. Kuvassa 13 on esitetty yleisimpien tuloilman hienosuodattimien erotusasteet eri hiukkaskokoluokissa. Nykyisin käytetään toimistorakennuksissa yleisesti F7-luokan suodatusta ja varsinkin taajamien keskusta-alueilla myös F8-luokan suodatus on yleistymässä. Huomionarvoista kuvassa 13 on se, että yli 1 μm :n hiukkasista voidaan poistaa jo noin 90 % F7-luokan suodatuksella ja ero seuraavaksi heikompaan, F6-luokan, suodatustasoon on merkittävä. Tehokkaalla tuloilman suodatuksella on mahdollista vähentää sisätilojen pinnoille. (Korhonen 2011)



Kuva 13. Hienosuodattimien erotusasteet eri hiukkaskokoluokissa, missä F8 on tehokkain ja F5 heikoin (Korhonen 2011).

Sisäilmastoluokitus 2008:ssa on asetettu tavoitearvot eri ilmastoluokille suodattimien suhteen taulukon 12 mukaisesti.

Taulukko 12. Eri sisäilmastoluokkien vaatimukset suodattimien suhteen (Sisäilmayhdistys 2009).

Suure	S1	S2	S3
Suodatusluokka	F8*	F7*	F6*
Ilmanvaihtojärjestelmän puhtausluokka	P1	P1	P2

4.3 Paine-ero rakennusvaipan yli ja rakennuksen ilmatiiveys

Hyvien sisäilmastotekijöiden muodostumisen kannalta rakennuksen paine-erolla, paine-suhteilla ja rakennuksen tiiveydellä on suuri merkitys. Rakennuksen tulisi olla tiivis, jotta tarpeen mukainen tuloilmavirta saataisiin tuotua hallitusti sisätilaan kontrolloidun ilmanvaihdon avulla. Paine-erojen vaikutukset sisäilman laatuun ovat keskeisessä asemassa, kun tarkastellaan rakenteiden läpi tulevia terveydellisesti haitallisia aineita, missä ilman epäpuhtaudet kulkeutuvat ilmavirran mukana rakenteista tai ulkoilmasta sisäilmaan. Mikäli rakennuksen ulkovaippa on epätiivis ja ilmanvaihtojärjestelmä epätasapainossa, tuulisella ja kylmällä säällä paine-erot aiheuttavat virtauksia rakenteiden sisällä ja rakenteiden läpi, jolloin rakenteet myös jäähtyvät paikallisesti ja suhteellinen kosteus saattaa nousta joissain jäähtyneissä rakenteissa (Kauppinen, Kovanen ym. 2006). Paine-

erot ulko- ja sisäilman välillä johtuu lämpötilaeroista aiheutuvasta niin kutsutusta savu-piippuvaikutuksesta, tuulen aiheuttamasta paineesta ja ilmanvaihdon aiheuttamasta sisäilman ali- tai ylipaineistuksesta ulkoilmaan nähden sekä rakenneratkaisuista (Vinha 2014). Rakennusmääräyskokoelman määräysten ja ohjeiden mukaan rakennus suunnitellaan yleensä ulkoilmaan nähden hieman alipaineiseksi kosteusvaurioiden välttämiseksi kuitenkin niin, ettei paine-ero ole suurempi kuin 30 Pa. Tämän lisäksi rakennuksen tilat, joissa syntyy runsaasti epäpuhtauksia tai kosteutta, järjestetään alipaineisiksi muihin tiloihin nähden, kuten saniteettitilat. (SRMK C4 2003) Paine-ero ei ole kuitenkaan vakio yksittäisen huoneen ulkorakenteissa. Sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron aiheuttama rakennuksen paine-ero muuttuu vertikaalisessa suunnassa, missä paine-eron aiheuttaa eri lämpötilassa olevien ilmamassojen tiheysero. Jos ulkolämpötila on kylmempi kuin sisälämpötila, rakennuksen sisäpuolen alaosaan muodostuu alipaine ja yläosaan ylipaine, kuitenkin niin että korkeussuunnassa alipaineen osuus on suurempi edellä mainitun savu-piippuvaikutuksen takia. Tämä ilmiö on hyvä huomioda, kun paikannetaan rakenteissa olevia mahdollisia epäpuhtauslähteitä.

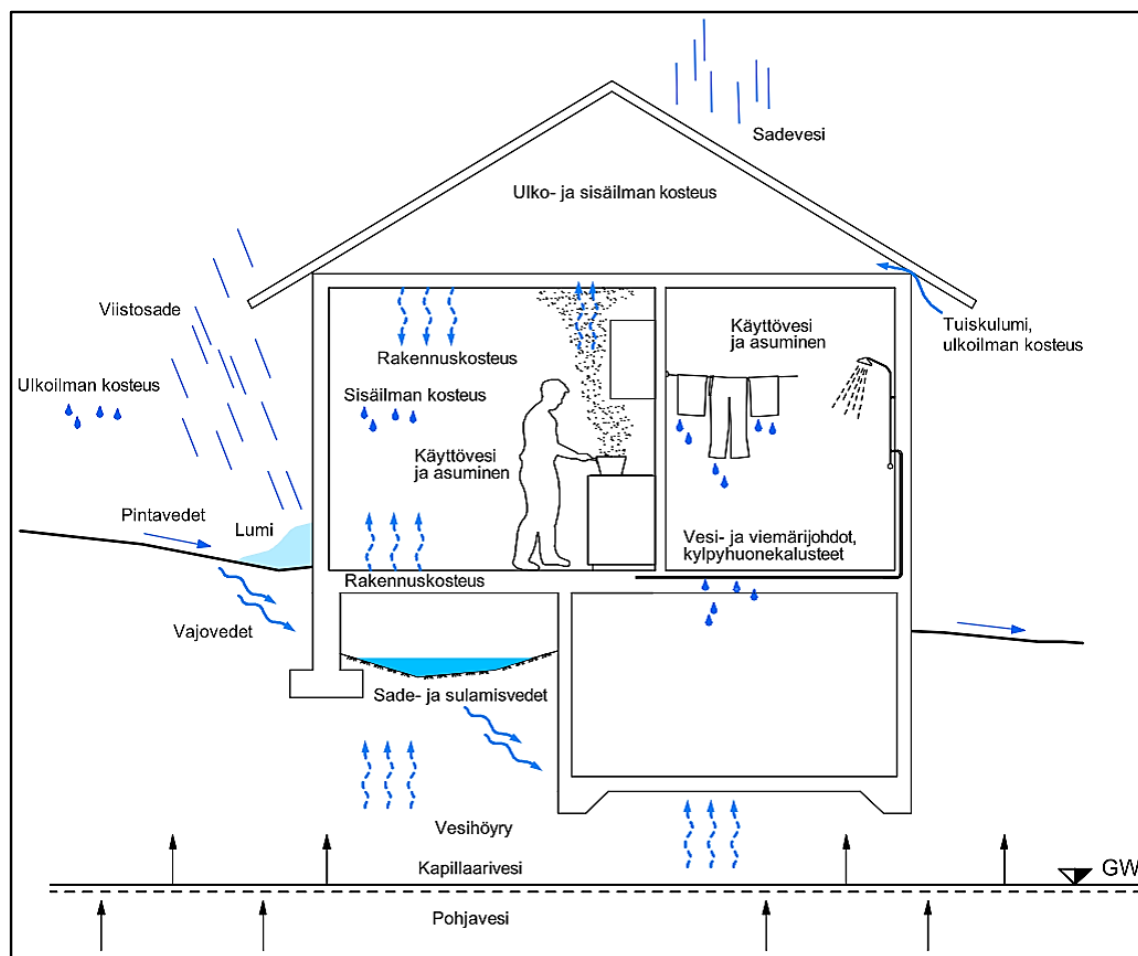
Haitta-aineiden kulkeutumisen kannalta tyypillisesti ongelmallisin tilanne aiheutuu kun ilmanvaihtoratkaisu on koneellinen poistoilmanvaihto ja korvausilman saannista ei ole huolehdittu. Tällöin merkittävä osa korvausilmasta voi tulla rakenteiden läpi, jolloin myös tuloilman suodatusta ei ole toteutettu ja näin ollen myös ulkoilman epäpuhtaudet kulkeutuvat sisätilaan rakennuksen epäjatkuvuuskohtien kautta (Sisäilmayhdistys 2008). Ulkoilman ja rakennuksen sisäilman välisen ilmanpaine-eron myötä rakenteissa olevat epäpuhtaudet voivat kulkeutua ilmapirran mukana sisäilmaan. Siten vaipan yli vaikuttava paine-ero vaikuttaa myös rakenteissa olevien epäpuhtauksien kulkeutumiseen sisäilmaan. Suomessa ongelmaa esiintyy erityisesti alueilla, joissa maaperän radonpitoisuudet ovat korkeat ja alapohjan yli vaikuttava paine-ero kuljettaa radonia rakenteiden läpi sisäilmaan, alapohjarakenteiden ollessa epätiivittä.

Rakenteiden ilmatiiveys riippuu käytetyistä rakennusmateriaaleista, sekä niiden asennuksesta. Mitä huonompi on rakennuksen ilmatiiviys, sitä enemmän pääsee vuotoilmaa rakenteiden läpi tai muista epäjatkuvuuskohdista. Ilmavuodolla tarkoitetaan rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välisten paine-erojen aiheuttamaa ilman virtausta eli konvektiota rakennuksen vaipan läpi. Rakennuksessa, jossa on hyvä ilmapitävyys, pystytään kontrolloimaan paremmin ilmanvaihtoa ja sisäilman laatua, kun suurin osa tuloilmasta saadaan suodatettua ja sitä kautta vähennettyä epäpuhtauspäästöjä tuloilman kautta. Edellytyksenä on kuitenkin se, ettei rakennuksen ilmatiiveys lisää liiaksi paine-eroja eli tulo- ja poistoilman säädöt on oltava tasapainossa. Rakenteiden ilmatiiviydellä on myös vaikutuksia kosteustekniseen toimivuuteen. Esimerkiksi viileämpinä vuodenaikoina epätiiviyyskohdista voi virrata ilmaa sisältä ulos paine-eron vaikutuksesta jolloin virtaava ilma jäähtyy ja sen sisältämä vesihöyry saattaa kondensoitua rakenteisiin. Näin voi käydä esimerkiksi sellaisessa rakenteen osassa, jossa ulko- ja sisäilman välisen paine-eron neutraaliakseli ylittää ja kyseisessä kohdassa sisäilman staattinen paine on hieman korkeampi kuin ulkoilman.

4.4 Lämpö ja kosteus sisäilmaongelmien aiheuttajana

Rakennuksen kosteusteknisessä suunnittelussa Rakennuksen ja sen eri rakenteiden kannalta merkittävimmät kosteudenlähteet ovat sade, ilman kosteus ja sen vaihtelut, maan kosteus, pintavedet, rakennuskosteus sekä rakennuksen eri toiminnoissa käytetty vesi (Vinha 2014). Edellisten lisäksi on joidenkin rakenteiden suunnittelussa otettava huomi-

oon myös putkistoihin, eristeisiin tai muihin taloteknisiin laitteisiin ja järjestelmiin syntyvät vesivuodot sekä märkätilojen kosteustekninen toiminta. Kuvassa 14 on rakennukseen kohdistuvat yleisimmät kosteusrasitukset.



Kuva 14. Rakennusta rasittavat kosteuslähteet (Vinha 2014).

Rakenteissa olevat kosteuspitoisuudet ja lämpötilat vaikuttavat sekä suoraan, että pitkällä tarkasteluvälillä sisäilman laatu-tekijöihin. Useiden rakennusmateriaalien emissiot kasvavat materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa kuten ammoniakkin, formaldehydin ja useiden muiden kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden tapauksissa. Vanhan rakennusmateriaalin emissiot voivat siten esimerkiksi indikoida rakenteissa olevaa kosteusvauriota. Mikäli rakennusmateriaaliin päätyy kosteutta tai materiaalin ympärillä olevan ilmankosteuden arvo on korkea, saattaa esimerkiksi pintakäsittelyaineiden aldehydyhdisteiden emissiot kasvaa merkittävästi tämän seurauksena. (Wirtanen 2006) Tänä päivänä rakennuksien materiaalien suhteelliseen kosteuteen ja sisäilmaan vaikuttaa ensimmäisen parin vuoden aikana enemmikseen rakennuskosteus, joka on jäänyt esimerkiksi rakennusaikana kastuneen lämmöneristeen sisään, mikäli eriste on asennettu huonosti hengittävään tilaan ennen kuin se on saavuttanut riittävän kuivat olosuhteet (Flannigan, Morey 1996). Myös betonivaluissa oleva vapaa vesimäärä voi olla vakava ongelma, jos päällysteenä käytetään huonosti vesihöyryä läpäisevää materiaalia ennen kuin betonin vapaana oleva vesimäärä on riittävässä määrin haihtunut. Rakennusprosessien aikatavoitteiden ollessa tiukat, tällaiset ongelmat saattavat lisääntyä.

Eräiden materiaalien ja rakenteiden VOC-emissioiden lisääntyminen esiintyy erityisesti lattiarakenteissa, joissa esimerkiksi muovimattojen pehmittiminä käytetyt flataatit hajoavat alkalisen kosteuden vaikutuksesta, mistä saattaa muodostua 2-etyyliheksanolia sisäilmaan kosteuspitoisuuden kasvaessa. Tämän lisäksi kosteissa tiloissa olevien PVC-muovimattojen hajoamistuotteena syntyvät voimakkaat, pistävän hajuiset, emissiot saattavat olla monille tuttuja hajuhaittoja aiheuttavia tekijöitä (Aikivuori 2001). Muita tunnettuja kosteuden ja lämmön aiheuttamia emissioita ovat esimerkiksi lastulevystä vapautuvan formaldehydin päästöt, jonka voi aikaansaada lämpötilan ja kosteuspitoisuuden nousu rakenteessa tai materiaalissa, jossa on käytetty ureaformaldehydiä liima-aineena (Crump, Squire ym. 1997, Salthammer, Mentese ym. 2010). Kemiaalliseen hajoamiseen tarvitaan usein emäksisiä olosuhteita, jotka mahdollistuvat sopivissa kosteus- ja lämpöolosuhteissa. Muun muassa kostean betonin pinnalla muovista ja liimasta vapautuva 2-EH (2-etyyliheksanoli) siirtyy diffuusion avulla betonihuokosissa, missä myös kosteus- ja lämpötilaerot ajavat molekyylejä liikkeeseen. Sjöbergin (2001) tutkimuksien mukaan jo 85 %:n suhteellinen kosteus betonirakenteessa aiheutti lattiapäällysteessä kohtuullisen suuria 2-EH-emissioita sisäilmaan (Sjöberg 2001).

Erilaisten bakteerien ja virusten aiheuttamat terveysriskit sisäilmassa ovat usein korkeammat suhteellisen kosteuden noustessa, mutta partikkelien tapauksessa terveysriskejä voi esiintyä paljon myös alhaisilla kosteuspitoisuuksilla, sillä kuiva sisäilman partikkeli voi aiheuttaa epätasapainoa limakalvojen kosteuteen lisäten mm. limakalvojen ärsytysoireita (Sundell, Levin ym. 2011). Joissain tapauksissa matalat sisäilman suhteelliset kosteudet voivat pahentaa myös ärsyttävien yhdisteiden aikaansaamia oireita ihmisessä (Wolkoff, Wilkins ym. 2006).

Kosteuden siirtyminen rakenteissa ja niiden läpi tapahtuu monien samanaikaisten siirtymismuotojen vaikutuksesta. Kosteus liikkuu rakennuksessa neljällä tavalla, vesihöyrynä diffuusiolla ja konvektiolla sekä vetenä kapillaarisesti ja painovoiman vaikutuksesta. Esimerkiksi sadevesi, lumi, jää, tiivistyvä vesi, ulkoilman suhteellinen kosteus ja maaperän kosteus ovat rakennuksen ulkopuolisia kosteuslähteitä. Vesi kulkeutuu kapillaarisesti rakennusmateriaaleissa ja myös niiden välillä, esimerkiksi tiileissä, laastissa ja betonissa olevia huokosia pitkin. Tämän lisäksi rakennukseen kohdistuu kosteusrasitusta myös rakennuksen sisäisistä lähteistä, jotka aiheutuvat pääsääntöisesti rakennuksen käyttäjän toiminnoista.

Sisäilman suhteellisen kosteuden vaihtelu vuodenaikojen mukaan voi vaikuttaa sisäilman epäpuhtauksien pitoisuuksiin. Esimerkiksi ammoniakkin ja formaldehydin tapauksissa on huomattu emission lisääntymistä korkeampien suhteellisten kosteusolosuhteiden vallitessa sisäilmassa (Järnström, Saarela 2005). Tietyissä rakennuksissa on näin ollen mahdollista mitata sisätiloissa korkeampia formaldehydin ja ammoniakkin konsentraatioita loppukesällä ja syksyllä verrattuna talviaikaan, jolloin sisäilman suhteellinen kosteus on muiden vuoden aikojen arvoja alhaisempi. Joskin virheellisestä rakennusfysikaalisesta suunnittelusta tai rakennusvirheistä johtuen saattaa talvella esiintyä sisäilman vesihöyryn kondensoitumista rakenteisiin tai rakennuksen osiin, jolloin kyseisissä kondensoitumiskohdissa voi vallita normaalia korkeammat kosteusolosuhteet ja korkeammat ammoniakki- ja formaldehydiemissiot. Sen sijaan Järnström ja Saarela huomasivat heidän tutkimuksissa, ettei suhteellisen kosteuden vaihtelujen todettu korreloivan sisäilman TVOC-pitoisuustason kanssa, vaikka eräiden yksittäisten VOC-yhdisteiden pitoisuuksilla havaittiin selvä korrelaatio sisäilman kosteuspitoisuuteen (Järnström, Saarela 2005).

Kosteusvaurioiden taustalla olevia tyypillisimpiä syitä ovat riskejä sisältävät suunnitteluratkaisut, puutteet työmaan kosteudenhallinnassa, virheet työmaatoteutuksissa ja kunnossapidon laiminlyönnit sekä rakenteiden luonnollinen kuluminen tai vaurioituminen elinkaarensa päässä. Erityisesti rakennuksen käyttöiän loppuminen näyttää johtavan sisäilmaongelmiin, joista terveyden kannalta merkittävimpiä osatekijöitä ovat kosteus- ja homevauriot. (Reijula, Ahonen ym. 2012) Korjausrakentaminen on oleellinen osa koko rakennuskannan rakennusteknistä huoltoa ja ylläpitoa. Kosteus- ja homevaurio-ongelma voi tulla esiin rakennuksen rakenteissa näkyvinä muutoksina, epämääräisen tunkkaiseksi koettuna ilmaa, homeen hajuna tai rakennuksessa olevien ihmisten oireiluna ja sairasteluna (Leivo 1998). Tunkkainen sisäilma ja homeen haju voi johtua orgaanisten kaasumaisten yhdisteiden haihtuessa mikrobeista ja vaurioituneista rakennusmateriaaleista, mikä saattaa indikoida homevauriota (Leivo 1998).

Materiaalivalintojen ja rakenneratkaisujen lisäksi olosuhteilla on ratkaiseva merkitys rakenteiden vaurioitumiseen ja pitkäikäisyyteen. Kosteusvaurioille riskialttiimpia kohtia rakennuksessa ovat pääsääntöisesti ne osat, joihin kohdistuva kosteusrasitus on suuri. Vesikatto, maata vasten olevat rakenteet ja kosteat tilat ovat kosteusteknisesti rakennuksen rasitetuimpia osia ja siten myös vauriot niissä ja niihin liittyvissä rakenteissa yleisimpiä. Toisaalta myös sellaiset rakenteet, joiden kuivuminen on erityisen hidasta, ovat riskialttiita esimerkiksi vuotojen ja vesivahinkojen yhteydessä. (Leivo 1998) Suurin osa kosteusvaurioista voitaisiin estää rakenteiden ja talotekniikkajärjestelmien oikealla suunnittelulla, huolellisella rakentamisella ja kunnossapidolla sekä oikealla käytöllä (Holopainen, Reijula 2012).

Huonon sisäilman aiheuttajaksi on usein syynä niin kutsutut riskirakenteet, sekä heikko rakennusfysikaalinen ja talotekninen toimivuus. Tällaisia ovat muun muassa eräät rakenneratkaisut, joiden kosteus- ja mikrobivaurioituminen on yleistä rakenteen käyttöiän aikana, koska muun muassa rakenteen kosteustekninen toiminta ja ilman vaihtuvuus ovat puutteellisia tai ilmavirtojen kulkureitit ei-toivottuja. Kosteusvaurioherkkä rakenne saattaa myös aiheuttaa kemikaalien kulkeutumista sisäilmaan, kuten aikaisemmin on jo todettu tässä diplomityössä. Näitä ilmiöitä tulee esille nykypäivän uudemmissakin rakennuksissa esimerkiksi formaldehydin osalta. Rakennuslevyt kuten lastulevyt, joiden yhtenä liima-aineena on ureaformaldehydi, käytetään vielä nykypäivänäkin. Esimerkiksi sisustusmateriaaleissa ja rakennusten lattiarakenteissa käytetään aluslattialevyä, jonka päälle valetaan muun muassa kuitubetonia. Aluslattialevynä toimii usein lastulevy huolimatta siitä, että kuitubetonin vapaa vesi saattaa aiheuttaa formaldehydiemissioita. Kevyemmissä ratkaisuissa lattiarakenne saatetaan toteuttaa lastulevylattiana, jossa lastulevy jää varsinaisen lattiapäällysteen alle, mutta on edelleen herkkä sisäisille kosteuslähteille ja vesiroiskeille.

Kosteusteknisesti oikein toimiva ja kosteusvarma rakennus pitää luoda tietoisesti, muun muassa suunnittelun ja toteutuksen keinoin. Kosteuden hallinnan prioriteettia tulee hankkeissa ja rakennuksen käytössä nostaa esille aina rakennuttajan tavoiteasettelusta lähtien ulottuen jokaisen osapuolen tehtäviin. Seikkaperäisillä kosteudenhallintatoimenpiteillä voi olla kustannuksia nostattava vaikutus, mutta tämä kustannuslisä on marginaalinen verrattuna hyötyyn: estetään sisäilmaongelmia ja säästetään suuria kustannuksia käytön ja ylläpidon aikana.(RIL 250-2011 2011)

Valtaosa rakennusfysikaalisesta suunnittelusta keskittyy rakenteiden toiminnan suunnitteluun, mutta kiristyvät energiatehokkuuteen ja sisäilman laatuun liittyvät tavoitteet ovat tuoneet suunnitteluun mukaan myös yhä enemmän koko rakennuksen toimintaan liittyviä

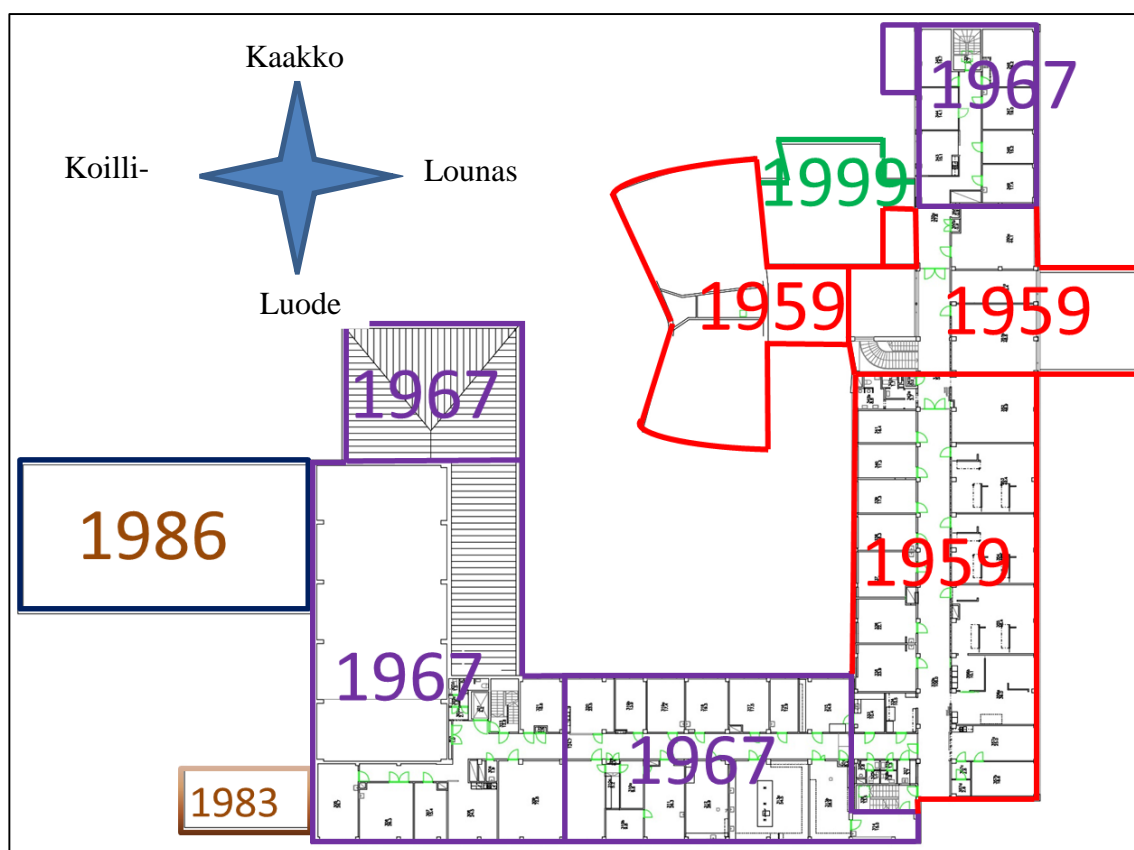
tarkasteluja, sekä näin ollen rakenteiden vaikutusta sisäilman laatutekijöihin (Vinha 2014). Rakennuksen käyttötarkoitus määrittelee rakennustekniset ominaisuudet uudisrakennuksen suunnitteluvaiheessa ja ominaisuuksien tulee olla rakennuksen käyttötarkoituksen edellyttämällä tasolla koko rakennuksen elinkaaren ajan.

Rakenteiden toiminnallisuus ja laadukas sisäilma saavutetaan pätevien suunnittelijoiden sekä vastuuntuntoisten rakennuttajien avulla ja saumattomalla yhteistyöllä eri osapuolten välillä. Tällöin tiedonkulku toteutuksen ja suunnittelun välillä tulee olla esteetöntä ja hankkeen eri osapuolten ymmärrys esimerkiksi rakennusfysikaalisesta suunnittelusta täytyy vastata rakentamisen tavoiteltua vaatimustasoa. Lähtökohtana on aina se, että rakennuksen käyttäjälle ei saa aiheutua terveydellistä haittaa rakennuksen toiminnasta ja tämän täytyy pysyä suunnittelijoiden ja rakennuttajien mielessä läpi koko rakennushankkeen.

5 Kenttäkokeet ja mittaukset

5.1 Tutkimuskohde

Kenttäkokeet suoritettiin Espoossa sijaitsevassa toimistorakennuksessa, joka oli rakennettu pääosin 50- ja 60-luvun aikana. Rakennuksessa on kolme kerrosta toimisto- ja luokahuoneille, sekä tutkimus- ja säilytystiloiksi tarkoitettu kellarikerros. Toimistorakennuksen vanhempi osa on rakennettu 50-luvun lopulla ja uudempi osa 60-luvun puolivälissä. Rakennus on betonirunkoinen, jonka lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa ja julkisivu on tiilirakenteinen. Tutkimuskohteena on eräs toisen kerroksen työhuone. Nimenomaisessa työhuoneessa ei ollut ennestään oireiltu huonon sisäilman vuoksi eikä suuria haitta-ainepitoisuuksia havaittu jo aiemmin tehdyissä tutkimuksissa, mutta kyseisessä rakennuksessa ja samassa kerroksessakin oli ilmentynyt joitain tilan käyttäjien oireiluja ja valituksia aiemmin. Kuvassa 15 on esitetty toimistorakennuksen eri osien rakentamisaikakohdat ja toimiston työhuoneiden sijainnit.



Kuva 15. Tutkittavan toimistorakennuksen pohjapiirros.

Tutkittava huone kuuluu rakennuksen osaan, joka oli rakennettu 50-luvun lopulla eli niin sanottuun vanhempaan rakennuksen osaan. Kyseisen huoneen ikkunapinta suuntautuu koilliseen. Tulo- ja poistoilmakanavat olivat halkaisijoiltaan 160 mm ja sijaitsivat molemmat huoneen käytävän puoleisella seinustalla. Tutkittavan huoneen tilavuus oli kalustamattomana 67,5 m³ ja normaalissa käyttötilanteessa, sekä mittaushetkellä huoneen ilmatilavuudeksi arvioitiin noin 64 m³. Huoneen ovi oli tiiviisti sulkeutuva, eikä suuria määriä ilmaa virrannut sitä kautta käytävän huoneen välillä. Koko rakennuskompleksiin oli tehty 2010 tiivistyskorjauksia, minkä ansiosta muun muassa ikkunoiden tiivistyksiä oli paranneltu.

5.2 Kokeellisen tutkimuksen tavoitteet, käytetyt tutkimuslaitteet ja mittausmenetelmät

Kenttäkokeiden tutkimuksissa lähtökohtana oli kerätä tutkittavasta toimistohuoneesta perustietoja tilan fysikaalisista ja kemiallisista olosuhteista. Tutkimusdatan avulla pyrittiin laskemaan ja määrittämään ilmanlaadun tasoa, sekä haitallisten aineiden kulkureittejä. Tutkimuksissa oli tarkoitus koota tietoa seuraavista asioista:

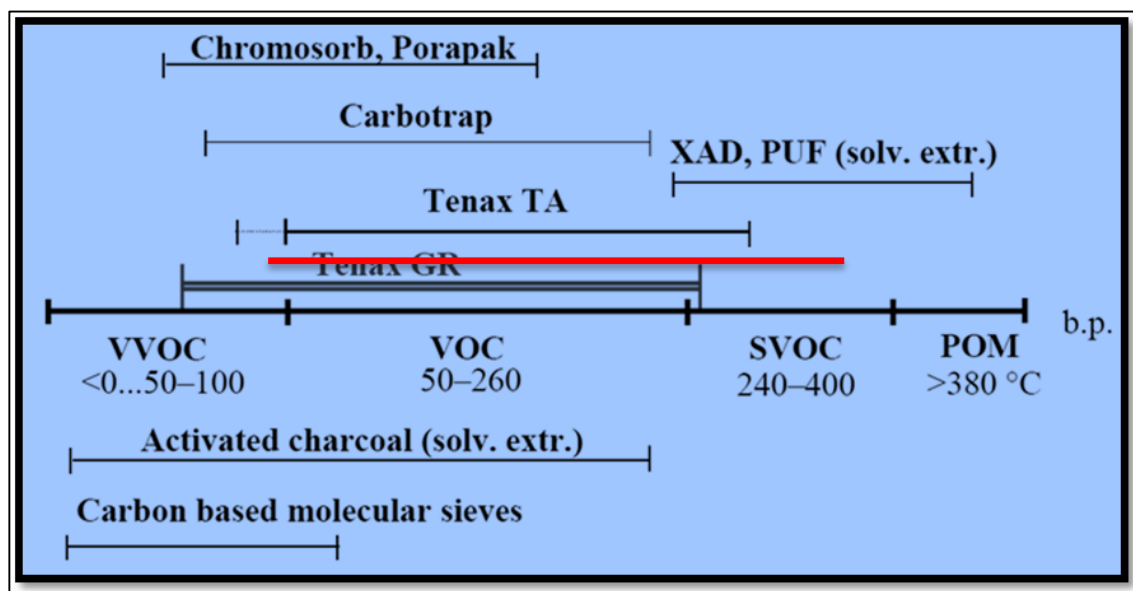
- Tutkimuskohteet
 - Rakennuksen käyttötarkoitus
 - Tilojen geometria ja eritoten ilmatilavuus
 - Rakennusmateriaalit ja rakennekerrokset
 - Ilmanvaihtolaitteiden toiminta ajan suhteen ja käyttötehot
- Sisäilmamittaukset
 - CO₂ online-mittauksella
 - TVOC online-mittauksella
 - PM2.5 online-mittauksella
 - Formaldehydi online-mittauksella
 - Ammoniakki online-mittauksella
 - Otsoni online-mittauksella
 - VOC-yhdisteet Tenax TA näyttein-
- Sisätilan fysikaalisten olosuhteiden seuranta
 - Lämpötila
 - Kosteus(RH)
 - Ilmanpaine-ero suhteessa ulkoilmaan
- Ulko-olosuhteiden seuranta
 - Lämpötila
 - Kosteus(RH)

5.2.1 Tenax TA näytteenotto ja analysointi

Kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden kemiallinen analyysi jaetaan kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen analyysiin. Kvalitatiivinen analyysi paljastaa, mitä aineosia tutkittava näyte sisältää. Kvantitatiivinen analyysi määrittää taas aineosien määrät tutkittavassa näytteessä. Kun näyte on valmis analyysia varten, voidaan aloittaa tutkittavan aineen määrittäminen. Standardinäyte, joka sisältää tutkittavat yhdisteet ja mahdolliset sisäiset standardit, ajetaan valitulla menetelmällä ja määritetään niiden retentioajat tai spektrit. Määrittämisen jälkeen on suoritettava vielä tulosten laskeminen ja tulkinta.

Yleisin menetelmä kerätä sisäilmasta haihtuvia orgaanisia yhdisteitä on ottaa ilmanäyte pumpulla Tenax TA adsorbentilla täytettyyn putkimaiseen ATD-keräimeen (ATD = automatic thermal desorption). Kerättävä ilmamäärä on 4–12 dm³, jolloin näyte edustaa hetkellistä tilannetta. VOC-näytteet kerätään imemällä ilmaa aktiivisesti kiinteään adsorptiomateriaalin läpi, yleisimmin Tenax TA putkeen. Näyte otetaan hengitysvyöhykkeeltä tutkittavan huoneen keskeltä. Mahdollisuuksien mukaan otetaan myös vertailunäyte vastavasta "puhtaasta" tilasta, ja tarvittaessa ulkoilmanäyte, mikäli epäillään epäpuhtauksien kulkeutuvan ulkoilmasta sisäilmaan. Näytteenottoaika on yleensä 0,5–2 tuntia. Menetelmä soveltuu kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen analyysiin, jossa adsorbenttinäytteet analysoidaan kaasukromatografilla ja kvantitoidaan massaspektrometrillä. (Salo 2014)

Tenax TA-adsorbentti on kehitetty erityisesti eri matriisien vapauttamien haihtuvien ja puolihaihtuvien orgaanisten yhdisteiden keräämiseksi. Se on 2,6-difenyleenioksidiin pohjautuva huokoinen polymeeriharts, joka sisältää vain vähän epäpuhtauksia eikä se vuoda näytettä ulos käytössä. Tenax TA ja veden affiniteetti on pieni, joten vesi ei pääse häiritsemään näytteenottoa eikä mittausta. Etuna on myös Tenax TA:n korkea 350 °C:seen ulottuva lämpötila-alue, joka paljastaa myös osan sisäilman SVOC-yhdisteistä. Kuvassa 16 on eri adsorbentteja, sekä niiden toiminta-alueet ja kuvassa 17 on Tenax TA adsorbenttiputki.



Kuva 16. Adsorbenttien jaottelu VOCien näytteenottoon (Villberg, Saarela ym. 2004).



Kuva 17. Tenax TA adsorbenttiputki

Käytettäessä yhdistettyä kaasukromatografi-massaspektromeritekniikkaa (GC-MS) näytteen eri komponentit erotetaan kaasukromatografilla ja tunnistetaan massaspektrometrilla. Menetelmän avulla voidaan tunnistaa luotettavasti eri yhdisteitä, myös monimutkaisista seoksista. Kaasukromatografi on analyysilaitte, jota käytetään haihtuvien ja termisesti stabiilien yhdisteiden kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen analyysiin. Yhdisteiden erottuminen perustuu niiden jakautumiseen liikkuvan- ja stationaarifaasin välille. Massaspektrometri on hyvä ja yleisesti käytetty detektori kaasu- ja nestekromatografiassa. Massaspektrometridetektorissa eluoituvan piikin yhdiste ionisoidaan ja kiihdytetään sähkökentässä, minkä jälkeen määritetään kyseisen ionin massan tai ionien massojen suhde sen varaukseen. Massaspektrometria käytetään yhdisteiden analyttiseen tunnistukseen ja massapitoisuuden määrittämiseen. Näyte voidaan syöttää joko suoraan massaspektrometriin tai se voidaan tehdä näytteensyöttimen avulla, mikäli laite on yhdistetty esimerkiksi kromatografi-laitteistoon. Kaasukromatografiassa erottuminen perustuu aineen jakaantumiseen kaasumaisen olomuodon, kantajakaasun, ja paikallaanpysyvän olomuodon, kiinteän faasin, välillä. Kaasukromatografissa höyrystyneet komponentit kulkeutuvat kanto-kaasun mukana kolonniin, jossa sen komponentit liikkuvat erilaisilla nopeuksilla riippuen niiden haihtuvuudesta ja vuorovaikutuksista kolonnin sisäpinnalla olevan nestefaasikerroksen kanssa. Kuljettuaan kolonnin läpi komponentit saapuvat vuorollaan detektorille, joka havaitsee yhdisteet tuottaen niistä signaalin. Signaalit näkyvät piikkeinä kromatogrammissa. Yhdisteiden tunnistaminen perustuu retentioaikaan, joka on kullekin yhdisteelle ominainen aika.

Tämän diplomityön kenttäkokeissa Tenax TA näytteiden analysointi tapahtui termodesorptiota ja kaasukromatografialla käyttäen yksittäisten yhdisteiden tunnistamiseen massaselektiivistä detektoria. Näytteistä analysoitiin haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä (TVOC), jonka lisäksi määritetään detektoitujen VOC:ien pääkomponentit ja niiden pitoisuudet. Kuvassa 18 on esitetty kenttätutkimuksissa käytetty GC-MS-yhdistelmälaite.



Kuva 18. Kaasukromatografi GC Clarus 580 (vasen) ja massaspektrometri MS Clarus 600T (oikea).

5.2.2 Sisäilman epäpuhtauksien ja termisten olosuhteiden mittaus

Online-mittauksissa eräänä tärkeänä tutkimuslaitteena käytettiin Graywolfoin tuoteperheen mittalaitteita, johon kuuluivat muun muassa TG 501- ja IQ 610-anturit toksisten kaasujen, epäorgaanisten ja orgaanisten yhdisteiden sekä termisten olosuhteiden mittaukseen. Kyseisillä antureilla mitattiin seuraavia tekijöitä sisäilmasta:

- T, Lämpötila [°C]
- RH, Suhteellinen kosteus [%]
- CO₂, Hiilidioksidi [ppm]
- TVOC, Haihtuvat orgaaniset yhdisteet [ppb]
- O₃, Otsoni [ppm]
- NH₃, Ammoniakki [ppm]
- CO, Hiilimonoksidi [ppm]
- SO₂, Rikkidioksidi [ppm]
- H₂S, Rikkivety [ppm]
- As, Arseeni [ppm]

Kuvasta 19 on nähtävissä edellä mainittujen anturien ulkomuoto ja kokoluokka.



Kuva 19. Greywolf tuoteperheen sensorit, TG-501 (vasen) ja IQ-610 (oikea)

Saman valmistajan tuoteperheeseen tai yhteensopiviin laitteisiin kuuluivat myös formaldehydin ja pienhiukkasten mittaukseen käytetyt laitteet, jotka esitellään paremmin kohdissa 5.2.3 ja 5.2.4.

5.2.3 Formaldehydipitoisuuden mittaus

Sisäilmasta mitattiin formaldehydipitoisuuksia käyttäen Graywolf FM-801-mittalaitetta. Mittalaitteen sisälle asennettavat sensorikelkat, jotka näkyvät kuvan 20 vasemman puoleisella osalla, reagoivat formaldehydin ja β -diketonin välisen kemiallisen reaktion seurauksena huokoiseen lasiin. Reaktion aiheuttaman lasin kellastuminen mitataan sähköelektronisella fotometrialla. Laitteen mittaustulos on 20 – 1000 ppb eli välillä $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja $1230 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mittaustulokset tallentuivat samaan tietojärjestelmään kuin Greywolfin muut laitteet, jolloin mittaustuloksia voitiin lähettää reaaliaikaisesti samaan datatiedostoon kuin laitteisiin kiinnitetyt muutkin sensorit. Näin ollen datan tallentaminen tapahtui näitten laitteiden osalta samanaikaisesti.



Kuva 20. Formaldehydin monitorointi ja mittauslaite Graywolf FM-801.

5.2.4 Pienhiukkasten mittaus

Tutkimuskohteen pienhiukkaspitoisuuden mittaamiseen käytettiin kuvan 21 Graywolfin tuotteisiin yhteensopivaa mittalaitetta, Thermo pDR-1500. Kyseessä on reaaliaikainen hiukkaspitoisuuden tallentava monitorointilaitte, jossa on mahdollisuus valitun hiukkaskoon mukaiseen kalibrointiin keräävän filterin avulla. Laite voidaan integroida

Graywolf-laitteistojen kanssa käytettäväksi, jolloin mahdollistetaan samanaikainen mitausdatan tallennus yhteiseen tietojärjestelmään. Mittausalueena on $0,001 \dots 400 \text{ mg/m}^3$, jossa suoritetaan automaattinen alueen valinta sen mukaan, mikä on haluttu tarkkuustaso miltäkin konsentraatioalueelta. Mittaukset ovat validoitavissa gravimetrisellä mittauksella, integroidun filterin avulla ja mitausdatan tallennuksen aikavälin voi valita yhden sekunnin ja yhden tunnin väliltä.



Kuva 21. Hiukkaspitoisuuden mittalaite, Thermo pDR-1500.

5.2.5 Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron mittaaminen

Tutkittavan huoneen sisätilan ja välittömän ulkoilman välistä paine-eroa mitattiin ilmanpainemittareilla ja tulokset tallennettiin, riippuen mittaustilanteesta, 1 – 5 minuutin sykleissä dataloggeriin. Ilmanpaine-eroa mitattiin Kimo CP100-merkkisellä ilmanpainesensorilla ja siitä saatavat arvot tallentuvat Eltek-dataloggerin tallentimeen. Kyseiset laitteet näkyvät kuvassa 22. Mittaus suoritettiin niin, että mittauspisteet olivat sisällä työpöydän tasolla, 1,2 metrin korkeudella, ja vastaavasti ulkona samalla korkeudella ikkunan läheisyydessä. Ikkunan karmiin oli porattu reikä, josta vietiin läpi ulkoilman paineen mittaamiseen käytetty kupariputki, tai tarkemmin kapillaariputki. Putki teipattiin ilmatiiviisti kiinni karmiin tehtyyn aukkoon, jotta saavutettaisiin mahdollisimman uskottavat mittausarvot ilmanpaine-erolle.

Paine-eroa mitattiin jatkuvana mittaussarjana muutamien kuukausien ajan, poissulkien ajankohdat jolloin mittausdata kerättiin talteen analysoitavaksi tai mikäli tilassa ei ollut muita mittalaitteita eikä näin ollen pystytty selvittämään ilmanpaine-erojen vaikutuksia sisäilmaan. Paine-eroa tutkittaessa huomattiin, ettei paine-eroa mittaava laite kyennyt selvästi havaitsemaan lähellä nollapaine-eroa olevia arvoja, mutta jo 3 – 4 Pa:n ja sitä suuremmat paine-erot saatiin laitteiden avulla mitattua.

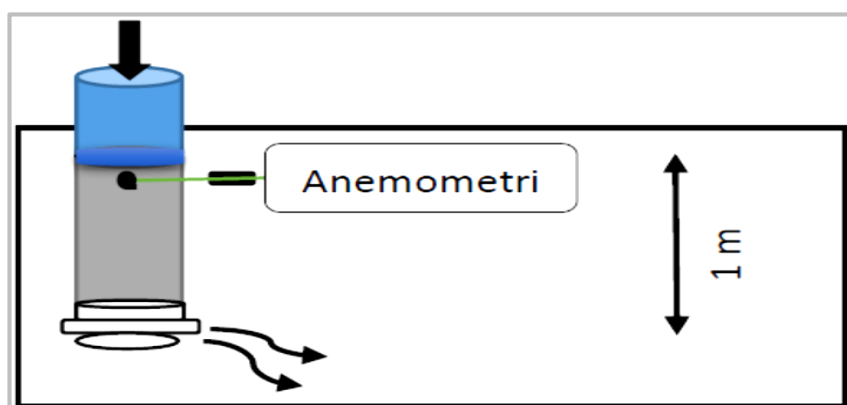


Kuva 22. Staattisen ilmanpaineine-eron mittari CP100 (vasen) ja datalogger Eltek 1000 Series Squirrel (oikea)

5.2.6 Tulo- ja poistoilmakanavan virtausnopeus

Tutkittavasta tilasta mitattiin tulo- ja poistoilmakanavien virtausnopeudet käyttäen hyväksi anemometriä. Käytetty mittalaite oli kuumalanka-anemometri, Lutron AM-4214SD. Kyseisen laitteen toimintaperiaate on kuumennetun langan resistanssin ja sitä sivuuttavan ilmavirran nopeuden avulla aikaansaatu langan pyrkimys jäähtymään, jonka seurauksena kuumalanka-anemometrin lanka pyrkii pitämään langan vastuksen vakiona. Koska vastus riippuu lämpötilasta yrittää piiri siis pitää langan vakiolämpötilassa, joka on esisäädettynä selkeästi korkeampi kuin ympäristön lämpötila. Kun kuumalanka-anemometrin lankaan osuu virtaavan ilman molekyylejä, siirtyy ilmaan langasta lämpöä ja elektronisen piirin täytyy lämmittää lankaa kovemmalla jännitteellä, jotta se pysyisi esisäädetyssä lämpötilassa. Jännite-ero virtaamattoman ilman ja virtaavan ilman tapauksissa on verrannollinen virtauksen voimakkuuteen ja sitä mittaamalla voidaan virtauksen nopeus havaita elektronisesti. Kuvassa 24 on esitetty kyseisen mittalaitteen malli.

Tulo- ja poistoilmakanavan ilmavirtojen määrittämiseksi oli rakennettava ilmavaihtoventtiilin kohdalle ilmanvaihtokanavan jatke johon porattiin reikä kuumalanka-anemometriä varten. Jatketun putken osan pituudeksi valittiin noin yhden metrin pituinen ja halkaisijaltaan 160 mm:n kokoinen metallinen IV-putki, eli luonnollisestikin poikkileikkausläpimitoiltaan vastaavankokoinen putki kuin olemassa olevat tulo- ja poistoilman IV-putket. Kuvassa 23 on periaatteellinen piirros ilmanvaihtokanavan ilmavirtojen nopeuden määrittämisessä käytetyistä menetelmistä.



Kuva 23. Huoneen tulo- ja poistoilman virtausnopeuden määrittäminen.

Kuumalanka-anemometri oli asennettu lähelle katon rajaa, tarkemmin ottaen kohtaan, jossa tuloilmaventtiili sijaitsi normaalitilanteessa. Anemometrin mittauspiste pyrittiin asettamaan keskelle putkea ja jatkun IV-putken päähän asennettiin samainen venttiili, joka normaalisti sijaitsi tulo- tai poistoilma kanavan päässä. Virtausnopeudesta saatiin muodostettua ilmavirran suuruus kaavalla 11:

$$q = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (11)$$

q on tilavuusvirta [m^3/s]

v on mitattu ilmavirran nopeus [m/s]

d on IV-putken poikkileikkauksen sisähalkaisija [m]



Kuva 24. Kuumalanka-anemometri, Lutron AM-4214SD (vasen) ja metallinen IV-putki (oikea)

5.3 Pulssikokeen mittausjärjestelyt

Koesarja, nimeltä pulssikoe, suoritettiin aina yhden päivän aikana ja koe jaettiin viiteen eri vaiheeseen, joissa kussakin muutettiin huonetilan olosuhteita määrätyksi ajaksi samalla ottaen Tenax TA näytteitä, sekä suorittaen online-mittauksia tutkimuskohteessa. Kussakin viidessä vaiheessa otettiin yksi 8 litran Tenax TA näyte (47 minuutin imuaika) huoneen keskeltä noin 1 – 1,5 metrin korkeudelta. Online-mittaukset olivat jatkuvatoimisia ja niiden ansiosta pystyttiin arvioimaan pienemmän aikavälin muutoksia, kun taas sisäilmanäytteet oli määrätty otettavan pidemmältä aikaväliltä sen mukaan, miten online-mittausten yhteydessä oli arvioitu muutosnopeuksien tapahtuvan.

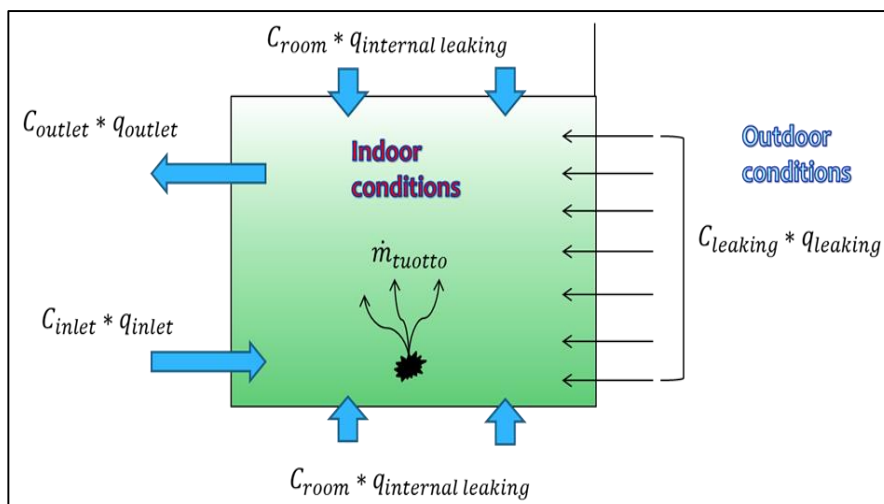


Kuva 25. Mittalaitteiden asennus tutkimuskohteessa.

Huoneessa ei ollut tutkimuksen aikana rakennuksen käyttäjiä, lukuun ottamatta kokeen suorittanutta henkilöä, jonka tehtävänä oli jokaisen vaiheen alussa paineolosuhteiden muuttaminen ja näytteiden ottaminen, kuitenkin niin, että oleskeluaika tutkittavassa tilassa oli mahdollisimman lyhyt, noin kaksi minuuttia kerralla. Huoneen yli- ja alipaine saatiin aikaan ilmanvaihtokanavan pikasulkuventtiileillä, mikä mahdollisti nopean muutoksen sisätilan ja ulkoilman välisissä painesuhteissa. Kohdissa 5.3.1...5.3.5 on kuvattu pulssikokeen eri vaiheiden mittausmenetelmät ja kuvien avulla havainnollistettu oletetut reaktiot tilassa. Kuvat 26...30 edustavat pulssikokeen kunkin vaiheen oletettuja epäpuhauksien kulkureittejä sisäilmaan.

5.3.1 Vaihe 1

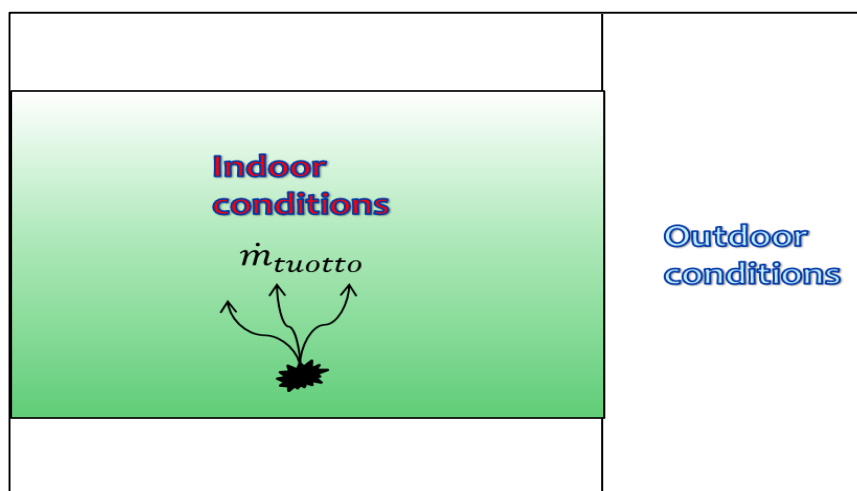
Tutkittavan huoneen sisäolosuhteet ovat normaalin rakennuksen käytön mukaiset ilmanvaihtuvuuden osalta. Tarkoituksena on saada normaalitilan vertailuarvot Tenax TA näyttein, kun ilmanvaihdon tasot on asetettu normaaliin käyttötilaan ja toimiston ovet, sekä ikkunat ovat suljettuina. Näytteenotto aloitettiin heti aamusta kun ilmanvaihto oli toiminnut normaaliteholla vähintään kolme varttia jolloin huonetilan ilma oli vaihtunut kertaalleen huoneen n-luvun ollessa noin $1,3 \text{ h}^{-1}$. Näytteenottoajaksi muodostui tunnin mittainen ajanjakso, jona aikana pystyttiin asettamaan sisäilmanäytteiden laitteet ja muut online-mittauksissa käytetyt kojeet.



Kuva 26. Vaiheen 1 oletetut siirtymisreitit epäpuhtauksien osalta.

5.3.2 Vaihe 2

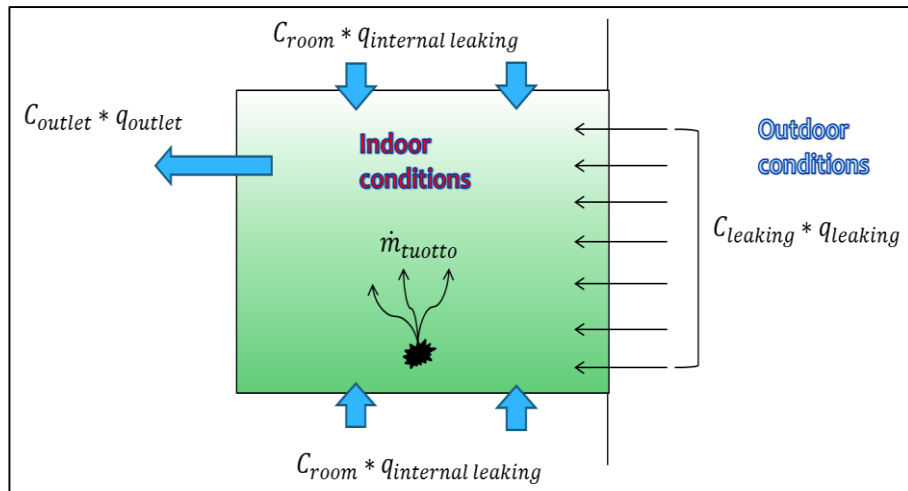
Tulo- ja poistoilmakanavat suljetaan pikasulkuventtiileillä ja aloitetaan Tenax TA näytteiden ottaminen noin tunti sen jälkeen, kun ilmanvaihto on minimoitu. Tarkoituksena on havaita huoneen sisäpinnoilla tapahtuvia mahdollisia pintaemissioita ja hiukkasmäärien asettumista, kun ilmaa ei tuoda tilaan eikä poisteta tilasta hallitusti. Näytteenotto aloitettiin noin tunti sen jälkeen, kun sulkuilmaventtiilit oli asennettu huoneen tulo, ja poistoilmakanaviin, jona aikana olosuhteet uskottiin asettuvan pysyvämpään tilaan.



Kuva 27. Vaiheen 2 oletetut mekanismit epäpuhtauksien osalta.

5.3.3 Vaihe 3

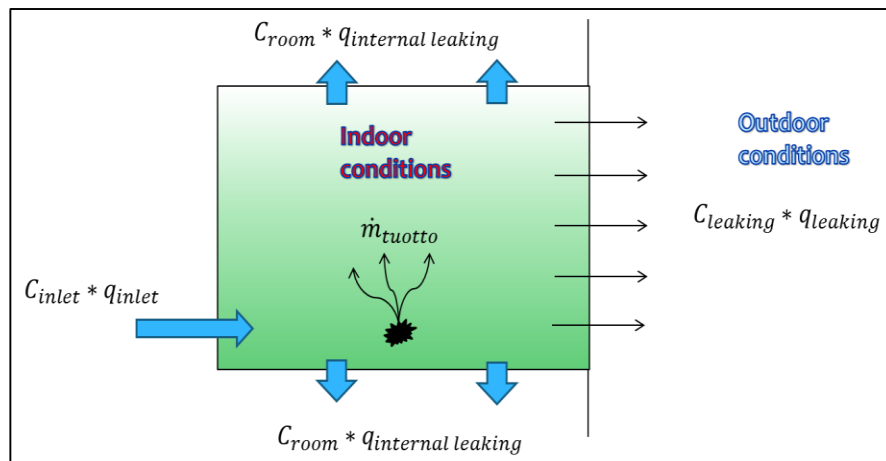
Tämän vaiheen alussa sisäilmaan aiheutetaan alipaineinen tila noin 25...30 minuutin ajaksi, jonka pyrkimyksenä on saada huoneilmaan sekoitettua mahdollisia haitta-aineita rakenteiden pinnoilta ja rakenteista imupaineen vaikutuksesta. Tämän jälkeen suljetaan ilmanvaihtokanavat ja annetaan ainepitoisuuksien asettua tilaan, jonka jälkeen otetaan Tenax TA näytteet. Tarkoituksena on mitata sisäilmasta mahdollisia haitallisia ainepitoisuuksia, jolloin dominoivaksi tekijäksi haitta-ainelähteen osalta oletetaan tutkittavan tilan rajoittavat rakenteet, ilmanvuotoreitit, pinnat, sisustusmateriaalit ja muut sisätiloissa olevat esineet. Sisäilmanäytteitä huoneesta ryhdyttiin ottamaan välittömästi imupulssin jälkeen. Imupulssiksi valittiin edellä mainittu aikamäärä, jona aikana huoneen ilmatila oli vaihtunut kertaalleen, kun poistoilman ilmanvaihtoventtiilin kuristus oli otettu pois ja ilmanvaihtokerroin tästä johtuen noin $2,5 \dots 3 \text{ h}^{-1}$.



Kuva 28. Vaiheen 3 oletetut virtausreitit sisätilan epäpuhtauksien osalta.

5.3.4 Vaihe 4

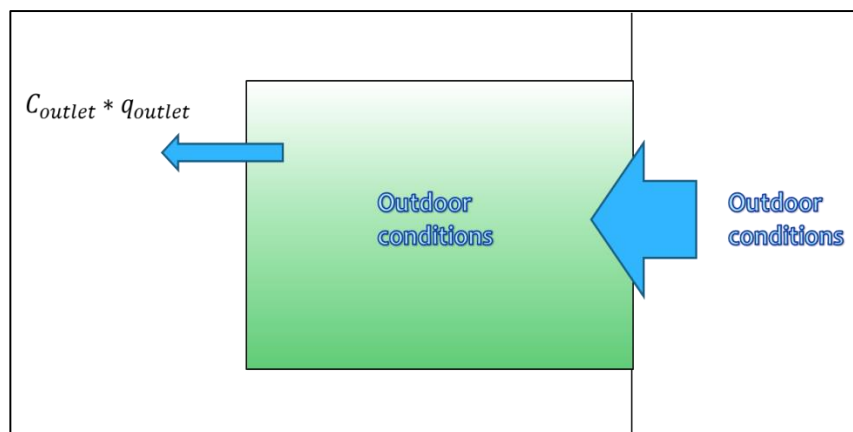
Aiheutetaan tutkittavaan tilaan ylipaine pitäen poistoilma suljettuna ja avaamalla tuloilmakanava. Tenax TA näytteet otetaan noin 1...2 tuntia ylipaineen aiheuttamisen jälkeen. Tarkoituksena on mitata ainepitoisuuksia joiden pääasiallinen lähde on tuloilmakanava. Vaihtoehtoisena ratkaisuna olisi voinut olla suoraan tuloilmakanavasta otetut ilmanäytteet, mutta sen sijaan kenttäkokeiden suunnittelussa päädyttiin arvioimaan suoraa vaikutusta sisäilman oleskelutilaan. Poistoilman tilavuusvirtaan ei pystytty vaikuttamaan, jonka takia ylipaineen muodostuminen ei ollut yhtä voimakasta kuin vaiheen 3 alipaineen muodostuminen. Tämän takia huoneessa tapahtuneet muutokset olivat myös hitaampia kuin vaiheen 3 muutokset ainepitoisuuksien osalta.



Kuva 29. Vaiheen 4 oletetut virtausreitit sisätilan epäpuhtauksien osalta.

5.3.5 Vaihe 5

Pulssikokeen viimeisessä vaiheessa avataan huoneen ikkuna ja pidetään tuloilmakanava suljettuna, jolloin pääasiallinen korvausilma tulee suoraan ulkoa. Tenax TA näytteiden otto aloitetaan noin 15 minuutin jälkeen ikkunan avaamisesta ja tarkoituksena on nähdä miten haitta-aineiden pitoisuudet laimenee tai lisääntyy riippuen ulkoa kulkeutuvista ainepitoisuuksista. Ulkoilmasta suoraan tulevaa virtausta haluttiin parantaa sulkemalla tuloilmakanava sulkuventtiilillä ja sitä vastoin lisäämällä poistoilman tehoa poistoilmaventtiilin kuristusta pienentämällä, jolloin ilmanvaihtuvuus tuloilmakanavasta mitattuna oli $> 3 \text{ h}^{-1}$, kun korvausilman tuottaminen ei aiheuttanut painehäviöitä ja ilman liikkeen vastusta. Vaiheen 5 arvot edustivat tutkimuksessa ulkoilman arvoja ainepitoisuuksien osalta.



Kuva 30. Vaiheen 5 oletetut virtausreitit epäpuhtauksien osalta.

5.4 Tutkimustulokset ja tulosten tulkinta

Tarkoituksena on löytää yhteys eri olosuhteiden, niiden muutosten ja sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien välillä tutkittavista tiloista. Erityisesti kiinnostavat haitta-ainepitoisuuksien muutosnopeudet ja muutokseen johtaneiden syiden analysoiminen muun muassa paine-erojen aiheuttamissa muutoksissa. Sisäilmamittauksissa saatujen epäpuhtauspitoisuuksien muutosnopeutta tarkastellaan siitä lähtökohdasta, että tutkittavan huoneen haitta-aineiden pitoisuutta mitataan ja tieto tallennetaan minuutin välein. Sen sijaan lämpötila, suhteellinen kosteus ja paine-erojen mittausdata kerätään väljemmällä aikavälillä. Muutosnopeuksia tutkittaessa pyritään kehittämään laskennallisia menetelmiä selittämään yhteydet luonnollisten ilmiöiden ja ainepitoisuuksien välillä käyttäen hyväksi jo tunnettuja laskentatapoja, sekä huonetilassa ja ulkoilmassa mitattuja arvoja.

Tulosten tarkastelussa painotutaan pääosin termisten olosuhteiden, paine-erojen, ilmanvaihdon, hiilidioksidin, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja pienhiukkasten muutostilojen analysointiin. Kenttäkokeissa suoritetuista mittauksista formaldehydin, ammoniakkin, otsonin, hiilimonoksidin, rikkidioksidin, rikkivedyn ja arseenin pitoisuudet olivat pääosin nollanäytteitä tai joissain tapauksissa laitevirian ilmetessä mitatut arvot eivät olleet uskottavia. Lisäksi online-mittauksin saadut TVOC-pitoisuudet kärsivät uskottavuuden puutteesta heikosti suoritettuna kalibroinnin takia, mutta online-mittausten TVOC:n tuloksista osa esitetään havainnollisena tutkimusdatana.

Pulssikokeissa mitatuissa PM_{2.5}-pitoisuuksista kyettiin arvioimaan kuinka paljon ilmaa virtasi eri rakennneosien läpi ja miten se vaikutti sisäilman laatuun. Saatiin suhteellisen uskottavalla tarkkuustasolla määritettyä vuotomäärät sisäisille siirtymille ja ulkoseinän läpi tuleville ilmavirroille tutkimuskohteen ollessa noin 20 Pa alipaineinen ulkoilmaan nähden. Tällöin poistoilmavirta oli noin 85 m³/h eli 23,6 l/s. Alipaineistuksen aikana noin 15 % vuotoilmasta tuli ulkoa julkisivun läpi tai muista epäjatkuvuuskohdista sisä- ja ulkopinnan rajaamien rakenteiden läpi ja 85 % vuotoilmasta tuli ympäröivistä tiloista, kuten viereisistä toimistohuoneista, alaslasketun katon epätiiviyistä osista ja käytävältä. Tämä tarkoittaa sitä, että huoneen ollessa noin 20 Pascalia alipaineinen, ulkoseinän läpi virtasi ulkoilmaa huoneeseen noin 3,5 l/s ja on syytä huomata, että rakennuksen ollessa kautta linjan alipaineinen, eivät rakennuksen sisäiset ilmavirrat ole yhtä dominoivia, sillä toimistohuoneet ja käytävät ovat painesuhteiltaan lähellä toisiaan.

Pulssikokeen vuotoilmareittien osalta tutkimuksen ajallista kestoa voitaisiin lisätä vaiheessa 3, jotta saataisiin tarkemmat arvot kuvastamaan tasapainotilan pienhiukkaspitoisuuksia. Kyseisessä tutkimusvaiheessa imupulssin aikaansaama PM_{2.5}-pitoisuudet nousivat arvosta 6,25 µg/m³ arvoon 7,4 µg/m³ ja laskennallisella tarkastelulla arvioitiin tasapainotilan konsentraation asettuvan lähelle arvoa 10 µg/m³, tutkimuskohteen ollessa noin 20 Pa alipaineinen ulkoilmaan nähden. Tämän tasapainotilan saavuttaminen olisi arvioiden vaatinut vähintään puolentoista tunnin mittaisen imupulssin, jona aikana olisi saavutettu tasapainotilan konsentraatiosta 95 %. Pulssikokeen vaiheessa 4 mitatut arvot, missä tuloilma oli dominoivin lähde, jäivät epätarkoiksi johtuen liian pienestä tuloilmavirrasta. Kyseisessä vaiheessa oli tarkoitus selvittää tuloilmasta aiheutuva pienhiukkasten määrän muutos, mutta tutkimustuloksien tarkastelussa tultiin siihen päätelmään, että PM_{2.5}-pitoisuudet olisi syytä mitata suoraan tuloilmakanavasta tai tuloilmasta kerätystä ilmapölystä. Pulssikokeen tuloksista voitiin kuitenkin päätellä, että tuloilman pienhiukkasten pitoisuus oli huomattavasti alhaisempi kuin ulkoilmassa oleva pitoisuus.

Pulssikokeiden yhteydessä mitattiin VOC-yhdisteitä ja niiden kokonaismäärää tutkimuskohteen sisäilmassa. TVOC-tasot olivat tyypillisen toimistohuoneen mukaiset eivätkä yksittäisten yhdisteiden arvot sinällään olleet korkeita. Merkittävää oli kuitenkin eri yhdisteiden pitoisuuksien muutos eri tutkimusvaiheissa, mikä antaa mahdollisuuksia tarkastella pulssikokeita uutena toimivana tutkimusmetodina. Vaiheiden 1 ja 2 TVOC-pitoisuudet olivat 38 µg/m³, vaiheessa 3 pitoisuus kasvoi arvoon 93 µg/m³, vaiheessa 4 TVOC-pitoisuus oli 45 µg/m³ ja vaiheessa 5 pitoisuus oli alhaisin, 33 µg/m³. Vaiheen 5 pitoisuus kuvasti ulkoilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärää ja vaiheessa 3 tutkittavan tilan sisäilmaa alipainestettiin määrättyksi ajaksi, jonka jälkeen tulo- ja poistoilma suljettiin VOC-näytteiden ottoa varten. Vaiheen 4 tulokset olivat hieman kyseenalaisia, sillä tuloksiin saattoi vaikuttaa vaiheen 3 suuremmat VOC-pitoisuudet, minkä seurauksena seuraavan vaiheen pitoisuudet saattoivat olla myös koholla.

Asetoni-pitoisuus oli yli 10 kertaa korkeampi vaiheessa 3 verrattuna muiden vaiheiden tuloksiin. Lisäksi undekaania esiintyi vaiheen 3 mittauksissa peräti 6,1 µg/m³, sen pitoisuuden ollessa erittäin vähäinen muissa neljässä vaiheessa. Nonanaalin ja beta-pineenin arvot olivat nousseet vaiheessa 3, niiden ollessa 2,46 µg/m³ (Nonanal) ja 3,86 µg/m³ (Beta-Pinene). Muissa vaiheissa nonanaalia ja beta-pineeniä ei pystytty detektoimaan. Sen sijaan etanolin pitoisuus oli vaiheessa 5 korkeampi kuin missään muussa vaiheessa. Tuloksista tehtiin oletamus, että etanolin pitoisuus ulkoa sisälle virtaavassa ilmassa oli 3,01 µg/m³, kun vaiheessa 4, tuloilman ollessa dominoivin lähde, sen arvo oli 1,51 µg/m³, vaiheessa 3 pitoisuus oli 0,47 µg/m³ ja vaiheissa 1 ja 2 sen pitoisuus jäi häviävän pieneksi. Etanolin kohonneet arvot vaiheessa 3 verrattuna vaiheisiin 1 ja 2 selittyy ulkorakenteiden läpi virtaavan ilman lisääntymisestä tutkimuskohteen sisäilman alipaineistuksen aikana. Vaiheen 3 TVOC-taso oli yleisesti ottaen edelleen melko alhainen, mutta tutkimustulokset osoittivat, että haihtuvien orgaanisten yhdisteiden epäpuhtauslähteiden paikantaminen on mahdollista pulssikokeen avulla ja kyseistä tutkimusmetodia on kannattavaa jalostaa tulevaisuudessa, jotta haitallisten aineiden pitoisuuksia ja niiden lähteitä pystyttäisiin täsmällisemmällä analyysillä arvioimaan.

Tutkimuskohteen termistä viihtyvyyttä arvioitiin syksyllä ja talvella 2014. Syksyllä, noin viikon ajanjakson tutkimuksissa, mitatuissa ja lasketuissa termisen viihtyvyyden tuloksista ilmeni, että sisäilma kuului lämpöviihtyvyydeltään 53 % ajasta kategoriaan A ja 47 % ajasta kategoriaan B. Vastaavasti talvella 2014 mitattujen, noin kahden viikon tarkastelujakson, arvojen perusteella sisäilma kuului lämpöviihtyvyydeltään 64 % ajasta kategoriaan A ja 36 % ajasta kategoriaan B. Lämpöviihtyvyyttä kuvaava laatukategoriat ovat

standardin SFS-EN ISO 7730 mukaan arvioitu koko ihmiskehon lämpötasapainon taulukkoarvoista ja niitä vastaavista mittaustulosten laskenta-arvoista. Syksyllä mitatut arvot, jotka poikkesivat kategoriasta A, johtuivat sisäilman lievästi kohonneesta lämpötilasta, jolloin PMV:n arvot olivat suuremmat kuin 0,2. Sen sijaan talvella mitattujen, A-kategoriasta poikkeavien arvojen osuus johtui sisäilman lämpötilan laskusta, jolloin PMV sai arvokseen vähemmän kuin -0,2. Tutkittavassa kohteessa sisäilman termiset olosuhteet olivat mittaustulosten perusteella hyvät tai kiitettävät riippuen tarkastelujaksosta.

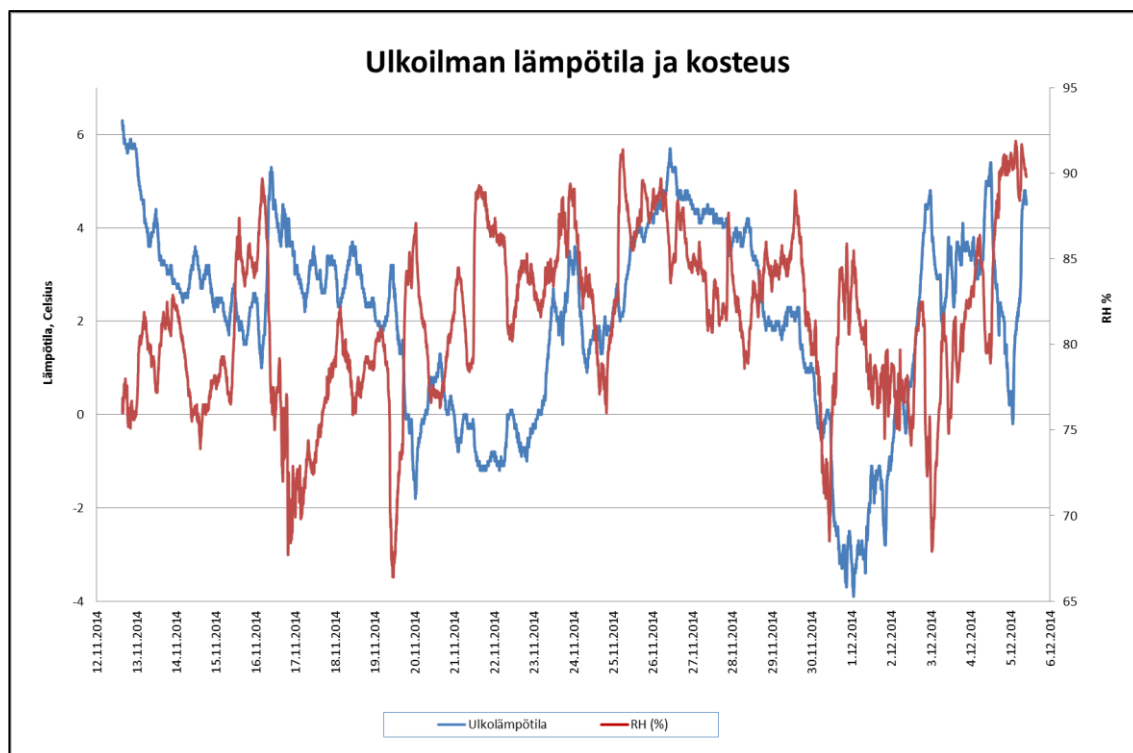
Tutkittavan tilan ja välittömän ulkoilman paine-eroa mitattiin ja seurattiin syksystä 2014 alkaen aina loppupalvelle 2015 asti. Paine-eron mittauksissa tarkasteltiin syvemmin ajan-kohtia, jolloin ulkolämpötila oli normaalia matalampi, sekä normaalitasolla. Joulukuussa 2014 ulkolämpötilan ollessa ajoittain alle -10 °C mitattiin korkeimmat paine-erot sisä- ja ulkoilman välillä, suurimmillaan 38 Pa, jolloin huoneen sisäilma oli alipaineinen ulkoilmaan verrattuna. Marraskuussa 2014 mitatun viikon ajanjakson mittaustulosten keskimääräinen arvo paine-erolle oli -3,6 Pa ja vaihtelu oli melko vähäistä. Joulukuun puolesta välistä lähtien paine-erojen tulokset alkoivat vaihdella huomattavasti ja etenkin yö- ja päiväarvot poikkesivat merkittävästi toisistaan. Mittaustulokset 19.12.2014 – 26.12.2014 välisenä aikana osoittivat yöllisten paine-erojen olevan keskimäärin noin -17,5 Pa, kun taas päiväarvot olivat lähellä nollatasoa. Paine-erojen vaihtelu aiheutui ilmanvaihtolaitteiden säädön seurauksena, koska paine-erojen arvot myötäilivät poikkeuksetta tiettyjä vuorokauden aikoja. Välillä 7:30 – 18:00 oli ilmanvaihdossa normaali asetus, välillä 18:00 – 20:00 oli eräänlainen siirtymävaihe ja välillä 20:00 – 7:30 ilmanvaihdon tuloilmavirta oli erittäin alhainen.

Ilmanvaihdon tasoa mitattiin kuumalanka-anemometrillä, jonka tulokset antoivat tutkimuskohteen ilmanvaihtuvuudelle n-luvuksi normaalissa käyttötilassa $1,3 - 1,4\text{ h}^{-1}$. Anemometrillä mitattujen poistoilmavirtojen määrissä huomattiin myös eroja yöaikaisella ja päiväaikaisella arvolla. Yöaikaan n-luku oli vuodenajasta riippuen $0,88 - 0,95\text{ h}^{-1}$, mitattaessa ilman vaihtuvuutta poistoilmavirrasta. Huomionarvoista oli myös se, että talviaikana tuloilman ilmavirrat olivat öisin erittäin pieniä, kun syksyllä mitattiin tuloilmalle noin 0,8:a vastaava n-luku tuloilmavirran ollessa yöllä noin 15 l/s .

5.4.1 Terminen viihtyvyys ja lämpöolosuhteet

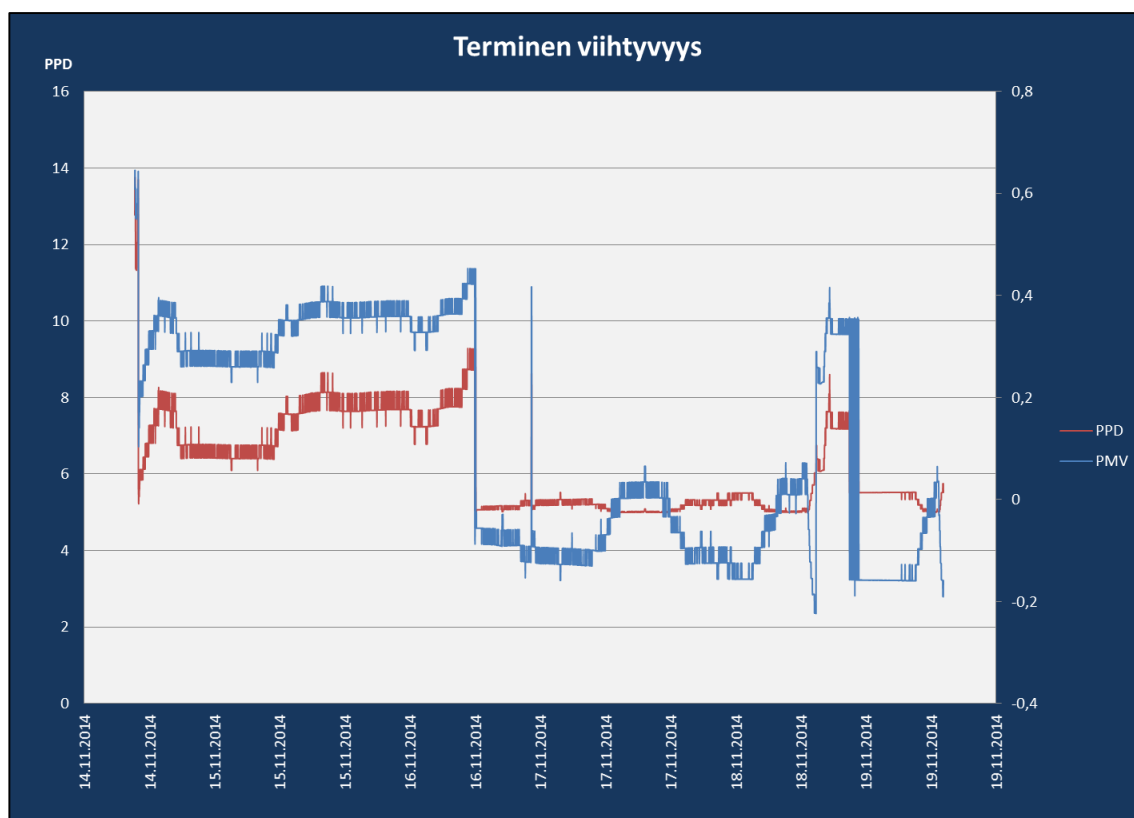
Sisäilman lämpötilaa ja kosteutta mitattiin noin kolmen kuukauden ajan. Tässä kappaleessa esitetään kahden ajanjakson mittauksia lämpöolosuhteiden osalta. Ensimmäinen ajanjakso oli 14.11.2014 – 19.11.2014 ja toinen ajanjakso 15.12.2014 – 29.12.2014. Ensimmäisellä ajanjaksolla ulkoilman lämpötilat olivat yleisesti hieman nollan yläpuolella ($T_{\text{ulko}} > 0\text{ °C}$). Toisella tarkastelujaksolla alkoi pakkasjakso, jolloin ulkolämpötilat olivat selkeästi alempia kuin ensimmäisellä ajanjaksolla. Sisäilman lämpötilasta ja kosteudesta koostuvaa entalpiaa laskettiin käyttäen kaavaa 1, sekä joitain muita muunnoskaavoja.

Termistä viihtyvyyttä mitattiin käyttäen standardissa SFS-EN ISO 7730 (2006) esitettyjä laskentamalleja ja kaavoja 2...8. Termisen viihtyvyyden laskentaan piti erikseen määrittää keskimääräinen pintojen säteilylämpötilat, \bar{t}_r , jota arvioitiin ulkolämpötilan perusteella käyttäen hyväksi aina mittauspäivän keskimääräistä ulkolämpötilaa ja sitä kautta arvioiden ulkoilman ja sisäilman välisen rakenteen osien sisäpinnan keskilämpötilaa. Huonetta ympäröivien pintojen kolme seinäpintaa sekä katto ja lattiapinta arvioitiin olevan lähellä sisälämpötilaa. Sisälämpötila mitattiin huoneen keskeltä ja näin ollen säteilylämpötilaa arvioitiin myös huoneen keskellä olevien näkyvyyskertoimien mukaan. Kuvas-
sassa 31 on 12.11.2014 – 6.12.2014 mitatut ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus.



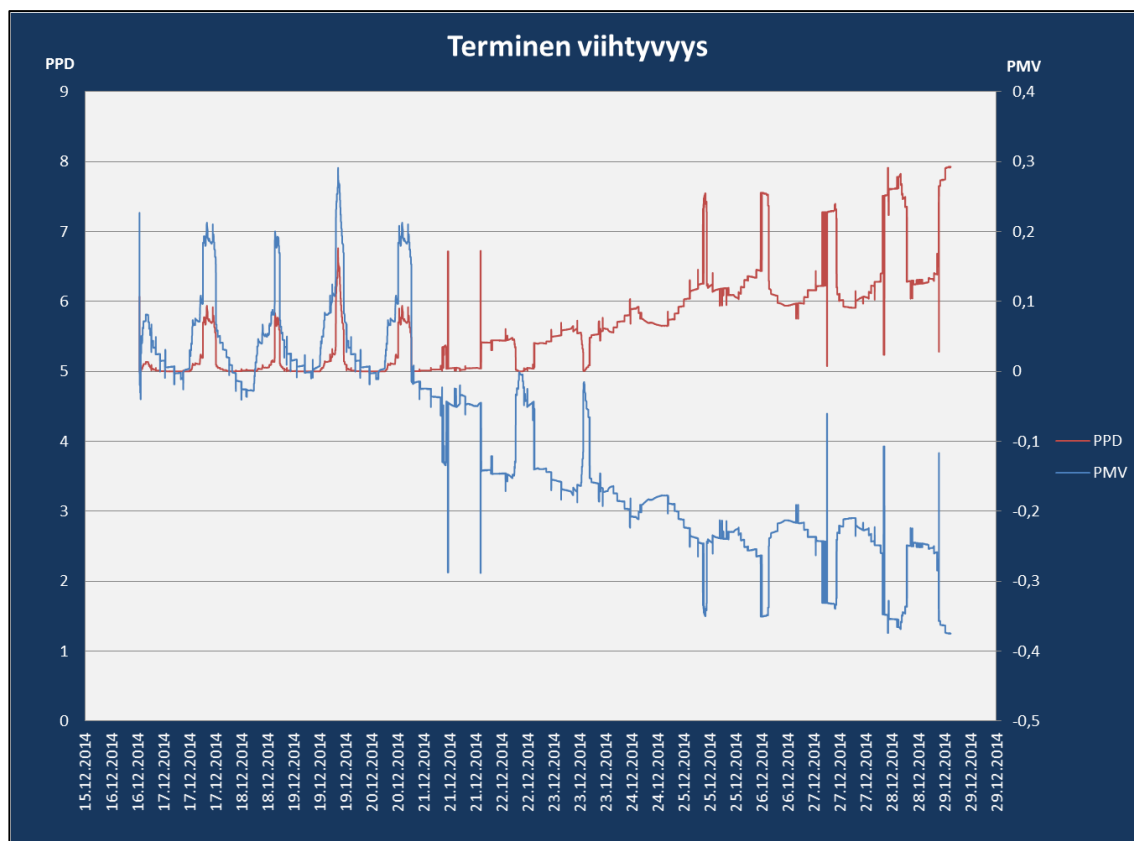
Kuva 31. Ulkoilman lämpötila ja kosteus tutkimuskohteen välittömässä läheisyydessä 12.11.2014 - 6.12.2014.

Termistä viihtyvyyttä määritettiin kahdelta ajanjaksolta, joista ensimmäinen oli 14.11.2014 – 19.11.2014 ja toinen 15.12.2014 – 29.12.2014. Molempien mittausjaksojen sisäilman lämpöolosuhteet olivat laadultaan suurelta osin erittäin hyvää. Ensimmäisellä mittausjaksolla keskiarvo PPD:lle oli 6,24, maksimiarvo 13,75 ja minimi 5,00. Maksimiarvo muodostui ajankohdasta, jolloin huoneeseen asennettiin mittalaitteita ja huoneessa oli useampi ihminen aiheuttamassa lämpökuormaa, jolloin sisäilman lämpötila oli noin 25 °C ja kosteusprosentti 21 %. Ensimmäisen mittausjakson aikana PMV:n keskiarvo oli noin 0,12, mikä tarkoittaa, että huone oli lievästi optimaalilämpöolosuhteita lämpimämpi. Kuva 32 edustaa ensimmäisen mittausjakson termisen viihtyvyyden tuloksia.



Kuva 32. Terminen viihtyvyys tutkimuskohteessa aikavälillä 14.11.2014 ja 19.11.2014, ensimmäinen mittausjakso.

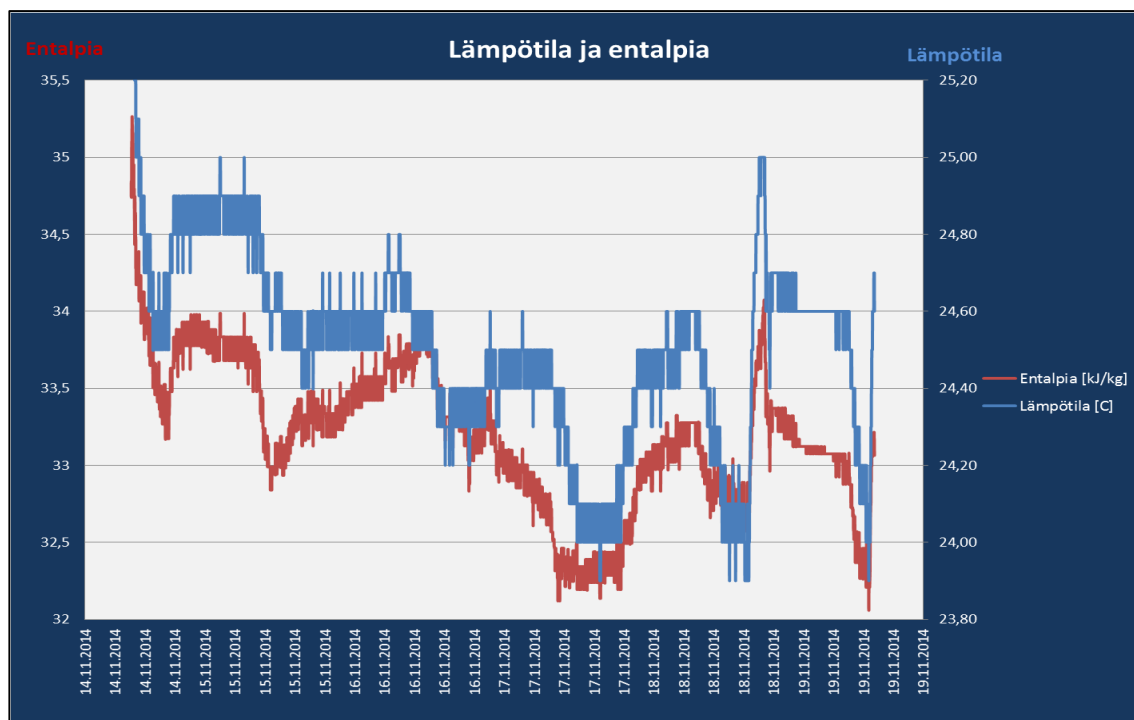
Toisella mittausjaksolla saatiin PPD:n keskiarvoksi 5,67, maksimiarvon ollessa 7,93 ja minimiarvon 5,00. Toinen mittausjakso suoritettiin aikana, johon kuului muun muassa joululomasta aiheutuneet pyhät, minkä takia sisäilmassa oli harvemmin tilankäyttäjiä paikalla. Tämä selittää myös erittäin korkean laatutason saavuttamisen sisäilma lämpöolosuhteiden osalta. PPD:n maksimiarvo saavutettiin 28.12.2014 huoneen lämpötilan ollessa noin 22 °C ja kosteuden 11 %, jolloin PMV sai arvoksi -0,37. Täten heikoimman mitatun lämpöviihtyvyyden arvon syyksi muodostui optimilämpöolosuhteita hieman viileämmät olosuhteet ulkolämpötilan ollessa muita mittausajankohtia kylmempää, eli noin -12 °C Espoossa. Kuvassa 33 on toisen mittausjakson tutkimustulokset.



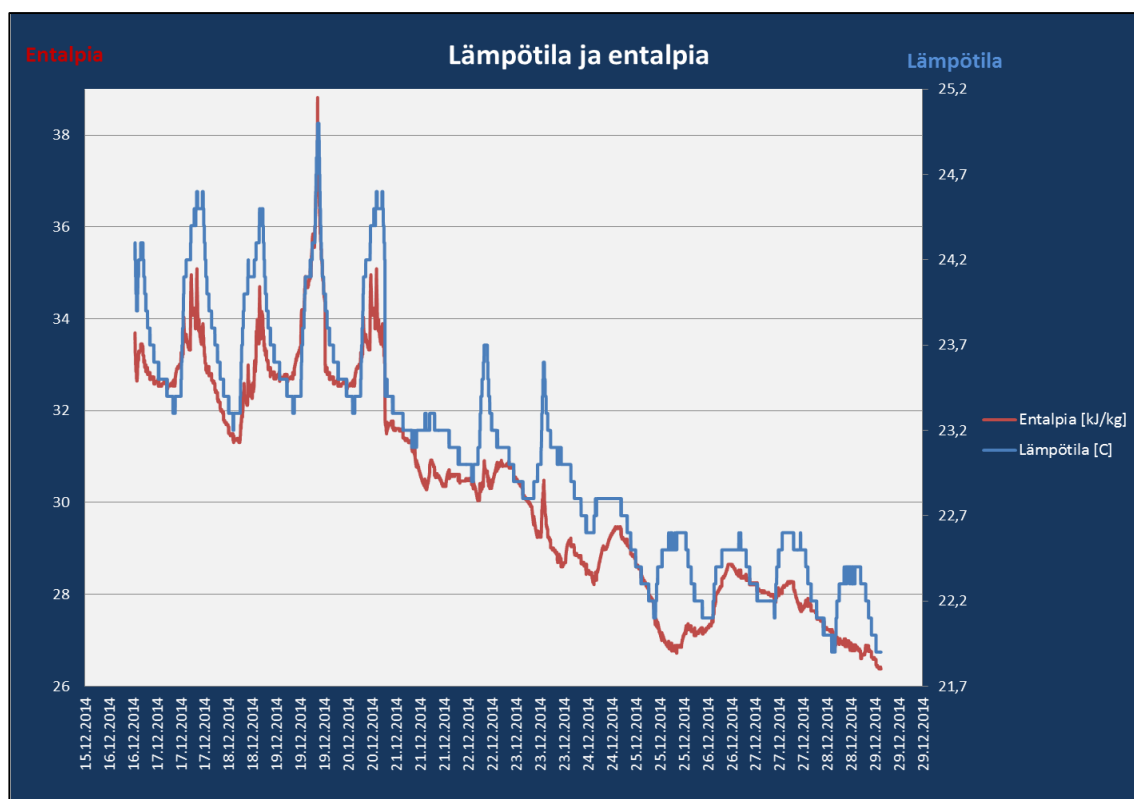
Kuva 33. Terminen viihtyvyys tutkimuskohteessa aikavälillä 15.12.2014 ja 29.12.2014, toinen mittausjakso.

Marraskuussa, noin viikon ajanjakson tutkimuksissa, mitatuissa ja lasketuissa termisen viihtyvyyden tuloksista ilmeni, että sisäilma kuului lämpöviihtyvyydeltään 53 % ajasta kategoriaan A ja 47 % ajasta kategoriaan B. Vastaavasti talvella 2014 mitattujen, noin kahden viikon tarkastelujakson, arvojen perusteella sisäilma kuului lämpöviihtyvyydeltään 64 % ajasta kategoriaan A ja 36 % ajasta kategoriaan B. Lämpöviihtyvyyttä kuvaava laatukategoriat on esitetty taulukossa 5 ja laskennassa on käytetty koko ihmiskehon lämpötasapainon taulukkoarvoja. Syksyllä mitatut arvot, jotka poikkesivat kategoriasta A, johtuivat sisäilman lievästi kohonneesta lämpötilasta, jolloin PMV:n arvot olivat suuremmat kuin 0,2. Sen sijaan talvella mitattujen, A-kategoriasta poikkeavien arvojen osuus johtui sisäilman lämpötilan laskusta, jolloin PMV sai arvokseen vähemmän kuin -0,2. Tutkittavassa kohteessa sisäilman termiset olosuhteet olivat mittauksien perusteella hyvät tai kiitettävät.

Huoneen sisäilman lämpötilaa ja kosteutta mitattiin ja tutkimustuloksista määritettiin ilman lämpösisältö eli entalpia. Kuvissa 34 ja 35 nähdään tutkimustulokset kummaltakin edellä mainitulta tarkastelujaksolta. Sisäilman lämpötila ei vaihdellut voimakkaasti, mutta vasta toisella tarkastelujaksolla päästiin sisäilmastoluokituksen S1-tasoon, kun sisälämpötila laski alle lämpötilan 23 °C. On kuitenkin syytä muistaa, että operatiivinen lämpötila oli alhaisempi kuin absoluuttinen lämpötila ja näin ollen edellä lasketut PMV- ja PPD-arvot antavat paremmin osviittaa tutkimuskohteen lämpöolosuhteista ja termisestä viihtyvyydestä, standardissa SFS-EN ISO 7730 on paremmin otettu huomioon sisäilman lämpöolosuhteisiin vaikuttavia tekijöitä.



Kuva 34. Tutkimuskohteen sisäilman lämpötila ja entalpia aikavälillä 14.11.2014 ja 19.11.2014.

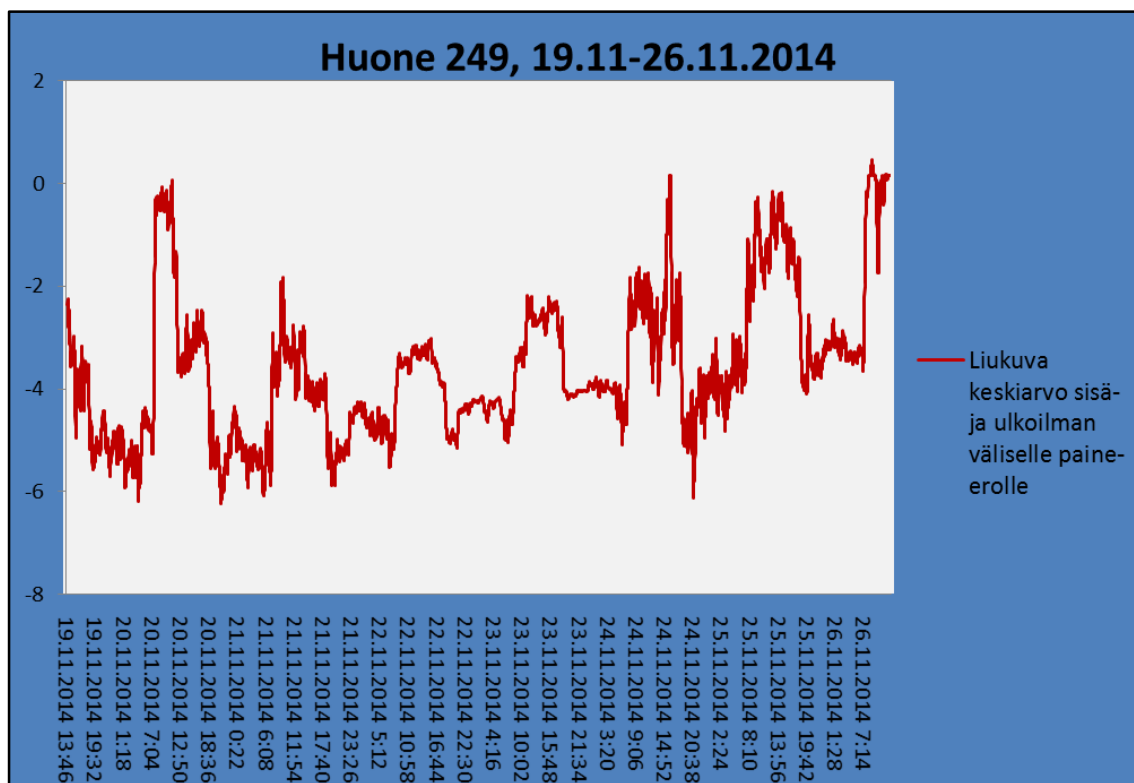


Kuva 35. Tutkimuskohteen sisäilman lämpötila ja entalpia aikavälillä 15.12.2014 ja 29.12.2014.

5.4.2 Sisä- ja ulkoilman väliset paine-erot

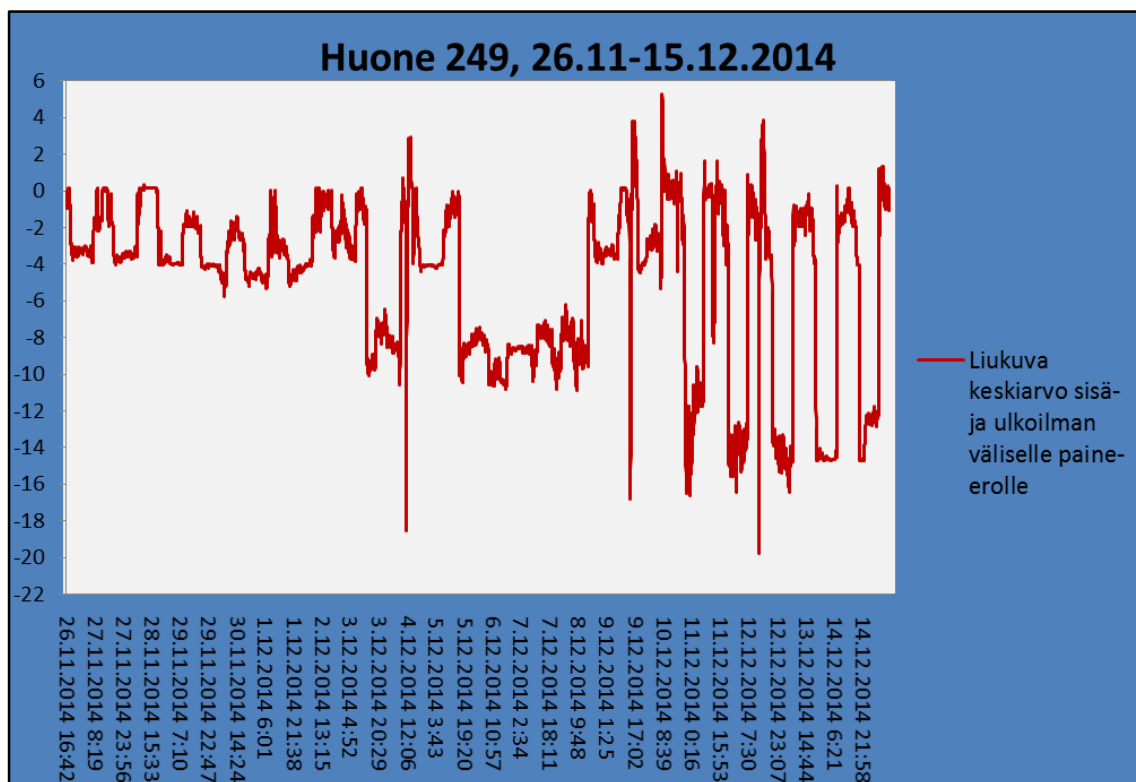
Tutkimuskohteesta mitattiin sisäilman ja välittömän ulkoilman välistä paine-eroa kolmen kuukauden ajan. Ensimmäinen mittaussarja suoritettiin 19.11.2014 – 26.11.2014 ja viimeinen mittausjakso oli 27.1.2015 – 18.2.2015. Syksyllä tutkimuskohteen ilmanpaine-erot sisä- ja ulkoilman välillä pysyivät melko alhaisina. Ensimmäisen mittausjakson esitetty kuvassa 36, jonka ajanjakson mittautulosten keskimääräinen arvo paine-erolle

oli -3,6 Pa. Kyseisen mittausjakson maksimi arvo paine-erolle oli 4 Pa ja minimi -15,2 Pa, joka mitattiin 24.11.2014 illalla ja tutkimusdatan perusteella kyseinen arvo johtui tuulisuudesta, koska kyseisen mittauksen molemmiin puolin mitattiin noin -6 Pa:n paine-erot. Tulosten perusteella pystyttiin toteamaan, että ilmanvaihto oli melko hyvin tasapainotettu eli tulo- ja poistoilmavirtojen suhteessa ei ollut merkittäviä puutteita.



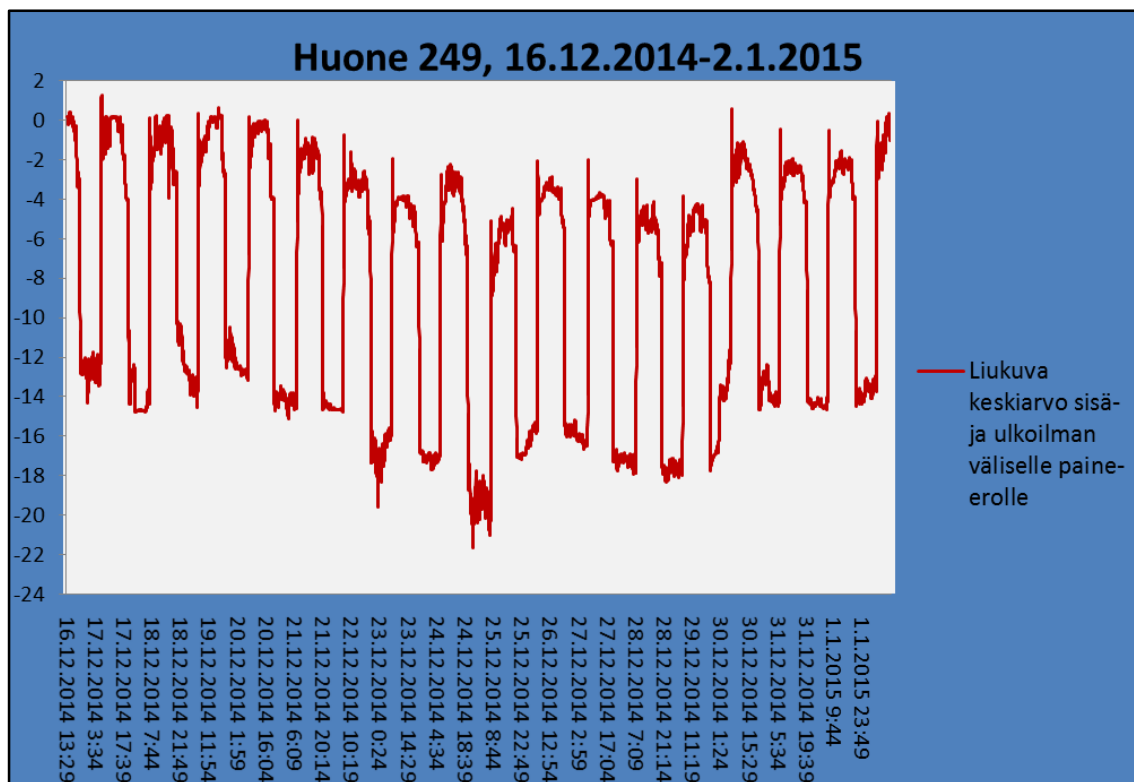
Kuva 36. Tutkimuskohteen sisäilman ja sen välittömässä läheisyydessä olevan ulkoilman välinen paine-ero 19.11.2014 - 26.11.2014. Paine-eron mittauksista on piirretty trendilinja, joka vastaa tuloksista saatujen arvojen liukuvaa keskiarvoa.

Toinen mittausjakso, jossa tutkittiin sisäilman paineolosuhteita, ajoittui välille 26.11.2014 ja 15.12.2014. Kuvassa 37 on mittaukselliset sisä- ja ulkoilman väliset paine-erot. Kuvasta nähdään 4.12.2014 oleva ilmanpaine-eron piikki, mikä johtui ensimmäisen pulssikokeen suorituksista, jossa huonetta alipainestettiin tarkoituksellisesti sulkemalla tuloilmakanava. Lisäksi tutkimustuloksista huomattiin, että joulukuun alun jälkeen sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron vaihtelu oli voimakkaampaa aikaisempaan verrattuna. Tuloksista huomattiin selkeä muutos yöllisen ajan ja päiväsaikaan mitattujen paine-erojen välillä. Päivällä ilmanvaihtolaitteet toimivat normaaliteholla, kun taas kello 20:00 jälkeen ja aina 7:30 asti ilmanvaihdon tuloilmakanava oli asetettu minimiteholla. Esimerkiksi 14.12.2014 klo 20:00 ja 15.12.2014 klo 7:30 välisenä aikana mitattiin paine-eron keskiarvoksi -14,4 Pa, minimiarvoksi -32 Pa ja maksimiarvoksi -8,5 Pa. Sitä vastoin 14.12.2014 klo 7:30 ja 20:00 välisenä aikana keskiarvo oli -1,1 Pa, minimiarvo -7,5 Pa ja maksimiarvo 4,1 Pa, mikä osoittaa, että päiväsaikaan tulo- ja poistoilmavirtojen suhde oli melko hyvä ja ulkona vallitsi kohtuullisen tyyni sää.



Kuva 37. Tutkimuskohteen sisäilman ja sen välittömässä läheisyydessä olevan ulkoilman välinen paine-ero 26.11.2014 - 15.12.2014. Paine-eron mittaustuloksista on piirretty trendilinja, joka vastaa tuloksista saatujen arvojen liukuvaa keskiarvoa.

Kolmas mittaussarja ajoittui välille 16.12.2014 – 2.1.2015 ja kyseisen ajanjakson tulokset näkyvät kuvassa 38. Tämän ajanjakson mittaustuloksista nähtiin sama ilmiö päivä- ja yöajan paine-eron vaihteluissa kuten toisessakin mittausjaksossa. Koko ajanjakson keskimääräinen paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä oli -8,5 Pa, johon vaikutti voimakkaasti yölliset suuret paine-erot. Minimiarvo ajanjaksolta oli -38 Pa ja maksimi 5,9 Pa. Minimiarvo oli mitattu 24.12.2014 kello 23:26. Kyseisen ajankohdan yöllisen paine-eron keskiarvo oli -19,3 Pa mittausjakson ollessa välillä 24.12.2014 klo 20:00 ja 25.12.2014 klo 7:30. Eri ajanjaksojen mittaustuloksista piirrettyjä kuvia on lisää liitteissä.

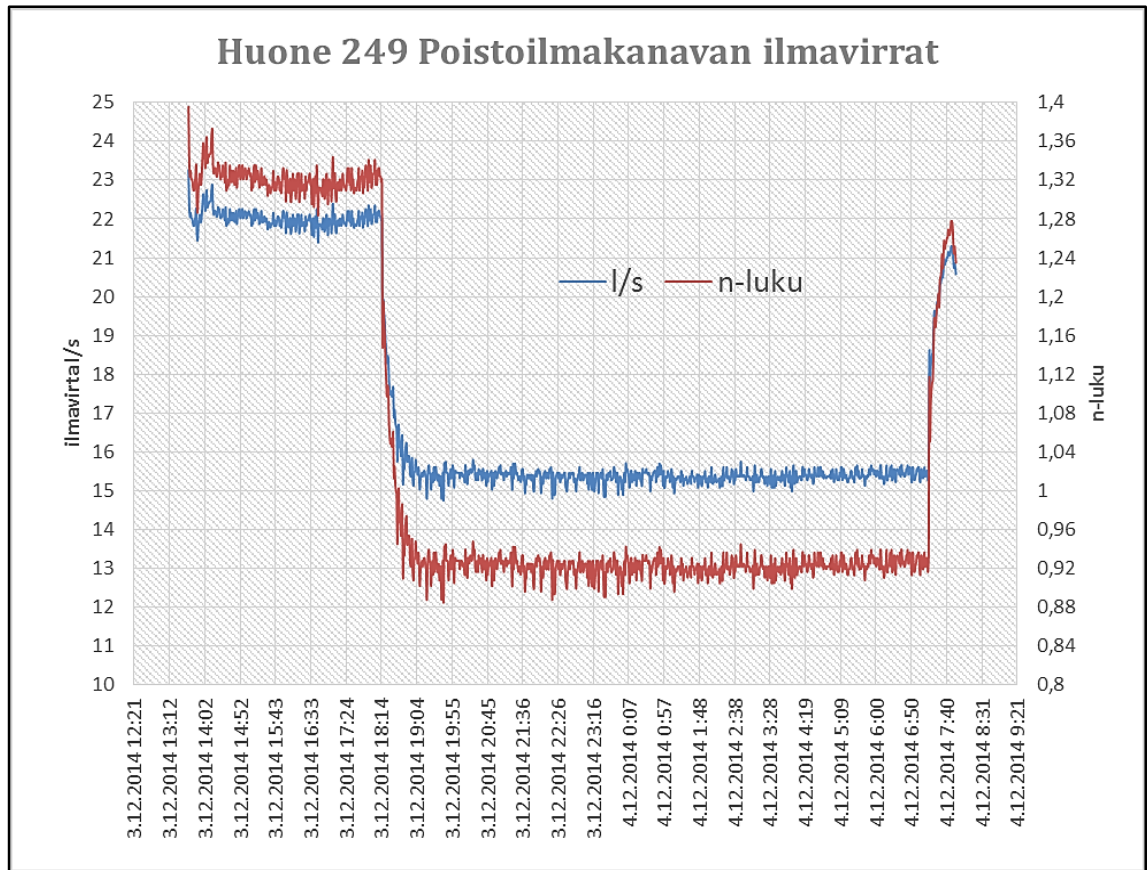


Kuva 38. Tutkimuskohteen sisäilman ja sen välittömässä läheisyydessä olevan ulkoilman välinen paine-ero 16.12.2014 - 2.1.2015. Paine-eron mittaustuloksista on piirretty trendilinja, joka vastaa tuloksista saatujen arvojen liukuvaa keskiarvoa.

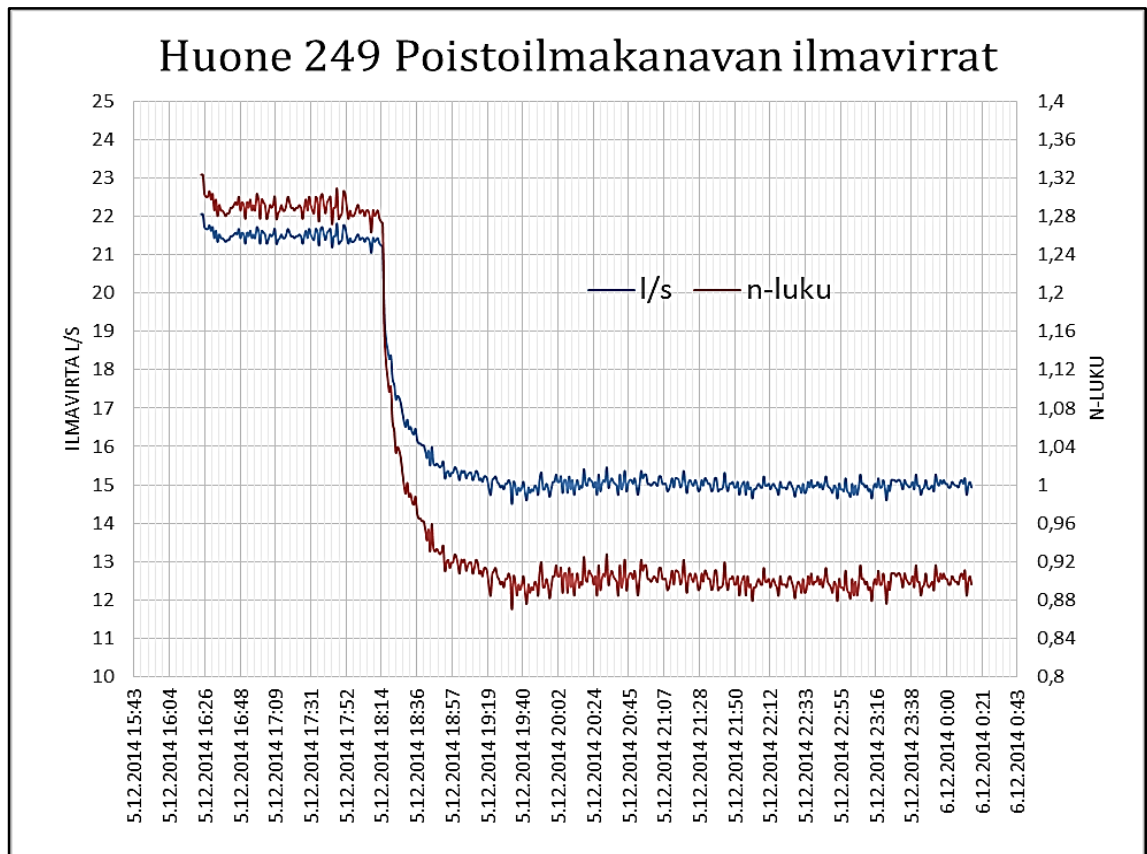
5.4.3 Ilmanvaihdon ja hiilidioksiditason mittaus

Ilmanvaihdon tehokkuutta mitattiin ja seurattiin muutaman vuorokauden ajan sekä tulo- että poistoilman osalta. Pidempiaikaisen ilmanvaihdon tehon seuranta ei ollut mahdollista suorittaa kuumalanka-anemometrin avulla, koska kyseiselle laitteelle ei saatu ulkopuolista virtalähdettä valmistusvian vuoksi ja sen takia laitteen virtalähteenä olleiden paristojen toiminta-aika oli yleensä vuorokaudesta kahteen. Sen sijaan kokeellisen tutkimuksen yhteydessä selvitettiin, kuinka hyvin esimerkiksi sisäilman hiilidioksidi-pitoisuuden väheneminen kertoi ilmanvaihtuvuudesta ja tutkimustuloksista kävi ilmi, että hiilidioksiditason mittaus ja sitä kautta laskennallisesti arvioitu ilmanvaihtuvuus oli erittäin luotettava menetelmä ilmanvaihtuvuuden laskemiselle. Tutkittavan tilan hiilidioksiditaso pysyi kaiken aikaa melko alhaisena osaltaan sen takia, ettei tilassa oleskellut kuin korkeintaan yksi henkilö ja osaltaan, koska ilman vaihtuvuus oli kohtuullisen korkea. Mitattujen hiilidioksidipitoisuuksien seuranta ei ole tässä diplomityössä tarkemmin esitetty.

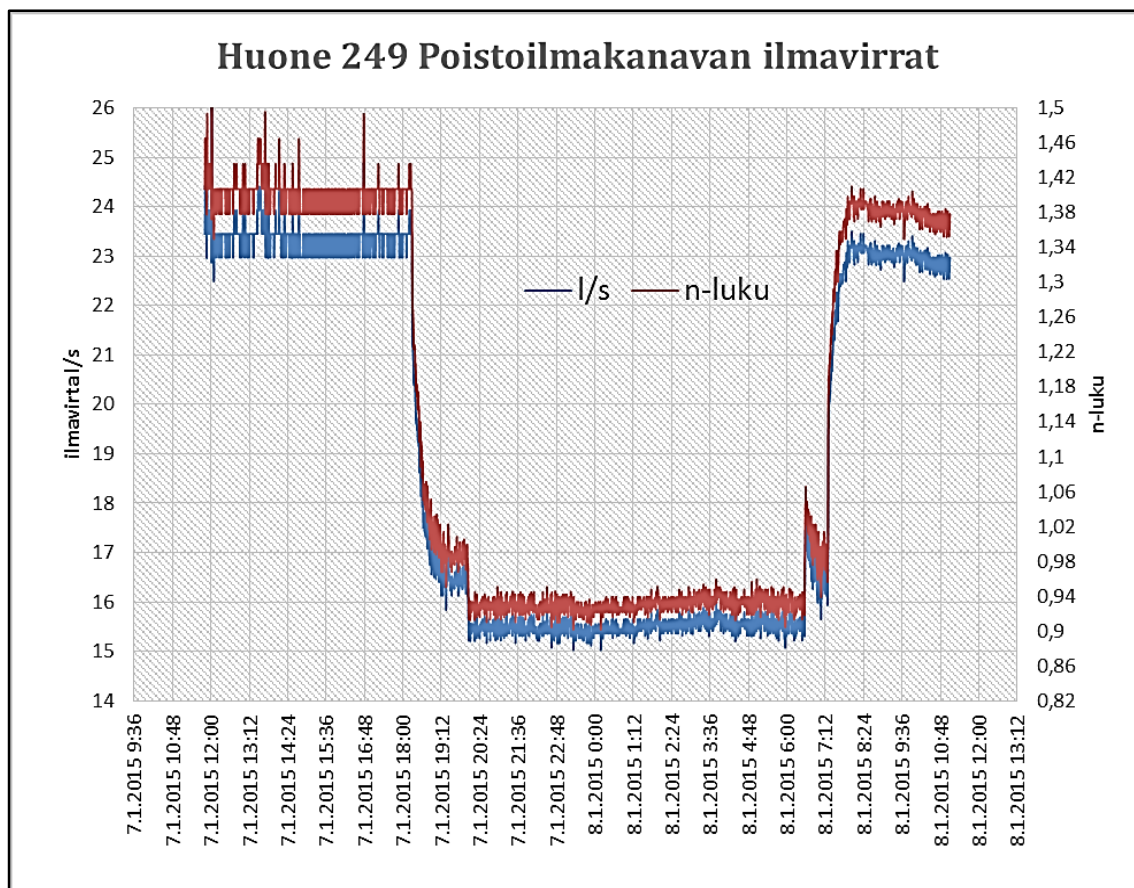
Kuumalanka-anemometrillä mitattu ilmanvaihdon tehokkuus poistoilman osalta suoritettiin 3.12.2014 – 6.12.2014, josta saatiin lähtötietoja poistoilmavirralle. Mittaustuloksista huomattiin, että ilmanvaihtolaitteella oli kaksi erilaista tehokkuuden säätöä mittaussajan kohtina. Ilmanvaihto toimi normaaliteholla noin kello 8:00 – 18:00 ja pienemmällä teholla muina ajankohtina. Ilmanvaihtolaitteiston ollessa päiväastekusella oli n-luku välillä 1,3 ja 1,4. Yöasetuksella vastaava arvo oli välillä 0,9 ja 0,95. Lisäksi huomattiin sisäilman olevan voimakkaasti alipaineinen yöllisenä aikana, minkä takia myös tuloilmavirtaa haluttiin mitata vuorokauden ympäri. Ongelmaksi muodostui laitevika, minkä takia tuloilmavirtaa ei saatu mitattua, mutta arviona oli, että tuloilman puhallus ei ollut päällä laisinkaan tai hyvin pienellä teholla yöaikaan. Kuvissa 39...41 näkyy mittaustulokset ilmanvaihdon poistoilmavirrasta eri vuorokauden aikoina ja eri päivinä.



Kuva 39. Ilmanvaihdon tehokkuus eri vuorokauden aikoina 3.12.2014 - 4.12.2014. Mitatut tulokset edustavat poistoilmavirrasta mitattuja parametreja.



Kuva 40. Ilmanvaihdon tehokkuus eri vuorokauden aikoina 5.12.2014 - 6.12.2014. Mitatut tulokset edustavat poistoilmavirrasta mitattuja parametreja.



Kuva 41. Ilmanvaihdon tehokkuus eri vuorokauden aikoina 7.1.2015 - 8.1.2015. Mitatut tulokset edustavat poistoilmavirrasta mitattuja parametreja.

Ilmanvaihdon tason määrittämisen jälkeen haluttiin nähdä, kuinka tarkasti sisäilma hiilidioksiditasoista pystyttiin laskennallisesti määrittämään ilman vaihtuvuutta tutkimuskohhteessa, koska kuumalanka-anemometrin käyttö oli hankalaa pitkäaikaisempia tarkasteluja ajatellen. Kuvassa 42 on esitetty erään ajanjakson mittaustulosten ja laskennallisten arvojen välistä suhdetta hiilidioksidin osalta. Laskennassa käytettiin kaavoja 12 ja 13, eli aika-askeleella tarkasteltua sekoitusyhtälöä, jossa sisällä tapahtuva hiilidioksidin tuotto oli määrätty olevan 0, kun hiilidioksiditaso oli laskeva ja hiilidioksidin tuotto, q_{CO_2} , oli $0,0227 \text{ m}^3/\text{h}$ ($44,946 \text{ g}_{H_2O}/\text{h}$) hiilidioksiditason ollessa nouseva. Kyseinen hiilidioksidin tuotto vastaa yhden ihmisen tuottamaa hiilidioksidin tilavuusosaa, kun tutkittavassa kohhteessa oleva henkilö tekee istumatyötä. Lisäksi tehtiin olettaus, että huoneessa on mitaushetkellä vain yksi henkilö tai ei yhtään henkilöä.

Muodostetut kaavat olivat seuraavan kaltaisia:

$$C_{N+1} = \frac{q_{CO_2}}{nV} (1 - e^{-n\Delta t}) + (C_N - C_\infty)e^{-n\Delta t} + C_\infty, \quad \text{kun } C_{n+1} > C_n \quad (12)$$

$$C_{N+1} = (1 - e^{-n\Delta t}) + (C_N - C_\infty)e^{-n\Delta t} + C_\infty, \quad \text{kun } C_{n+1} < C_n \quad (13)$$

$$V = 64 \text{ m}^3$$

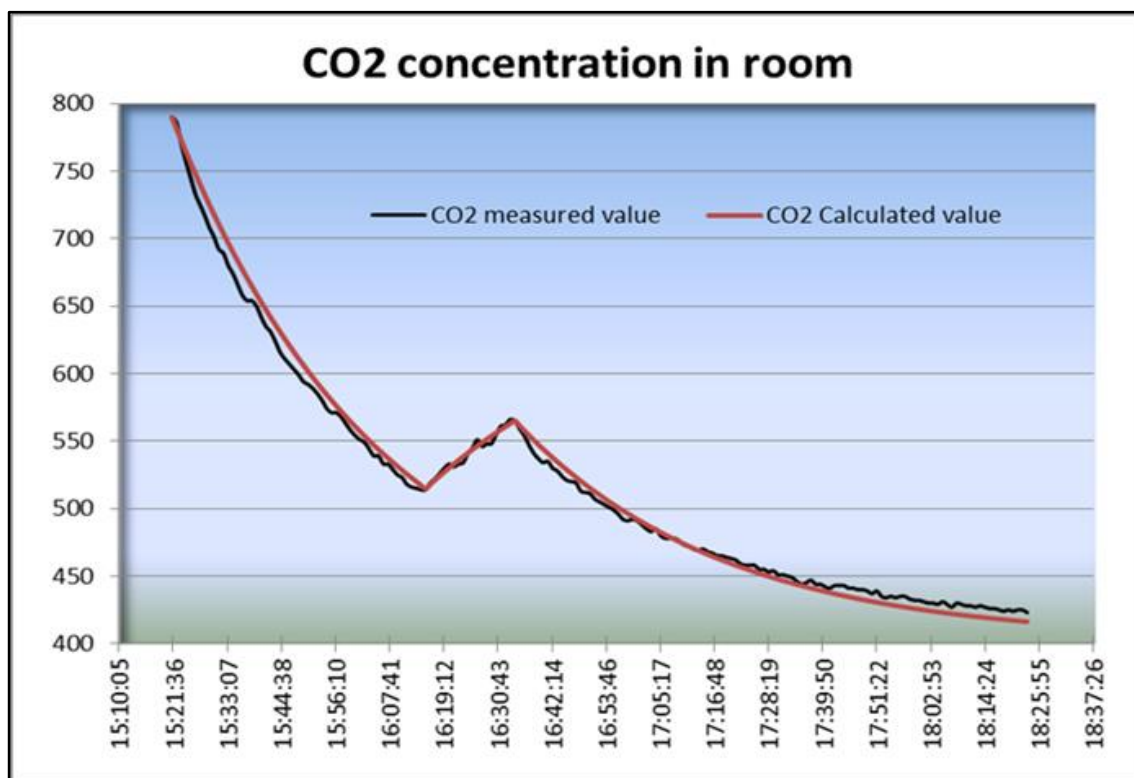
$$n = 1,32 \text{ h}^{-1}$$

$$q_{CO_2} = 0,0227 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_\infty = 405 \text{ ppm (ulkoilman taso mitaushetkellä)}$$

$$\Delta t = 1 \text{ min (0,0167 h)}$$

Laskentatuloksen ja mitatun tuloksen välinen ero oli erittäin pieni, kuten kuvasta 42 nähdään. Mittaustulosten hiilidioksiditaso väheni alussa hieman nopeammin, mutta erot taasoittuvat laskentatuloksen ja mittaustulosten välillä melko nopeasti. Riippuvuudesta ei tehty tarkempia tilastollisen poikkeaman analyyskejä, vaan tarkoituksena oli havainnollistaa laskentatuloksen kelpoisuutta ja käyttää laskentakaavoja esimerkiksi määrittettäessä huoneen ilmanvaihtokerrointa. On syytä muistaa, että laskentatuloksesta huomattavasti enemmän hiilidioksiditaso on nouseva, mikäli hiilidioksidin tuotto tapahtuu lähellä mittauspistettä. Tämän takia ilmanvaihtuvuutta määrittäessä on syytä suorittaa laskentatoimet, kun hiilidioksiditaso on vähenevä ja näin ollen tasaisesti sekoittunut huoneilmassa. Vastaavasti sisäilman pienhiukkasten konsentraatiota tutkittaessa suoritettiin laskennallinen tarkastelu käyttäen hyväksi sekoitusyhtälön ja massataseen kaavoja, jossa pyrittiin arvioimaan muun muassa pulssikokeen eri vaiheiden stationaaritilan $PM_{2.5}$ arvoja. Tästä on kerrottu enemmän kohdassa 5.4.5.



Kuva 42. Hiilidioksidipitoisuuden mitatut arvot sekä laskennallisesti määritellyt arvot.

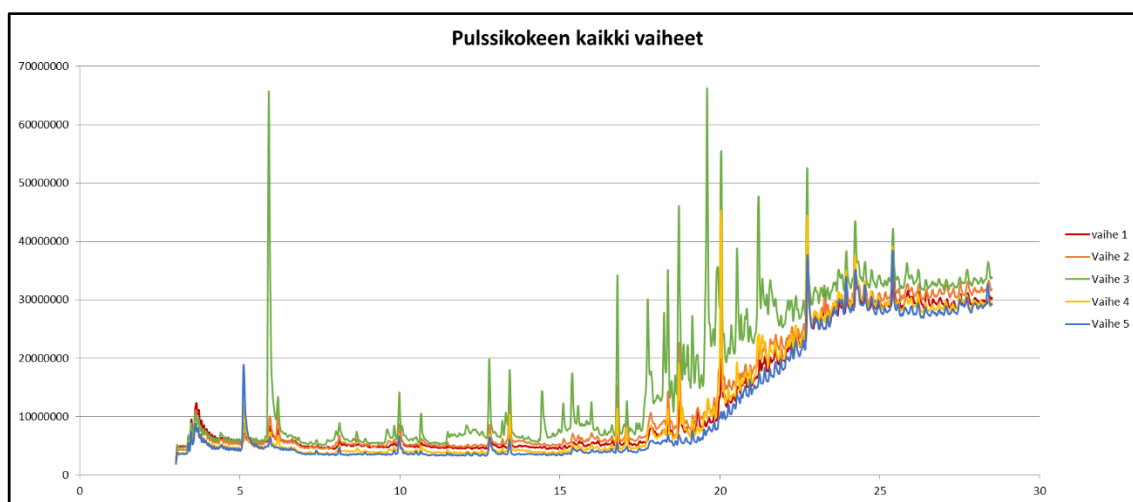
5.4.4 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Tutkimuskohteen sisäilmasta mitattiin pulssikokeen yhteydessä kaasumaisia orgaanisia yhdisteitä (Tenax TA näyte) sekä huoneen keskeltä, että erikseen valituista oleskeluvyöhykkeen kohdista. Lisäksi yhdisteitä mitattiin muun muassa alaslasketun katon sisältä ja ulkoseinään poratuista rei'istä. Ulkoseinän läpi porattujen aukkojen näytteistä ei kuitenkaan saatu luotettavaa tutkimusdataa johtuen epäonnistuneesta filteröinnistä. Tutkitavasta tilasta otettiin myös vuorokauden vaihtelua kuvaavia VOC-näytteitä kahden viikon ajalta, mutta GC-MS-laitteiston vian vuoksi kyseiset näytteet tuhoutuivat eikä tutkimustuloksia saatu analysoitavaksi. Pulssikokeen yhteydessä saadut VOC-näytteet olivat kuitenkin luotettavia ja niistä kerrotaan kappaleessa 5.4.4.1 tarkemmin.

Mittaustuloksista saaduista arvoista voidaan todeta, ettei sisäilmassa esiintynyt merkittäviä määriä haitallisia yhdisteitä ja TVOC-pitoisuudet pysyivät melko alhaisina. Tärkeätä oli kuitenkin huomata, kuinka tutkimuksen eri vaiheissa kaasumaisten yhdisteiden määrät muuttuivat suhteellisella tasolla jopa merkittävästi, mikä tarjoaa siten mahdollisuuksia jatkotutkimuksia varten. Eräiden yhdisteiden arvon nouseminen jopa yli kymmenkertaiseksi muiden vaiheiden arvoihin verrattuna voi antaa osviittaa siitä, mistä jokin aine on peräisin ja miten se vaikuttaa täten rakennuksen käyttäjään.

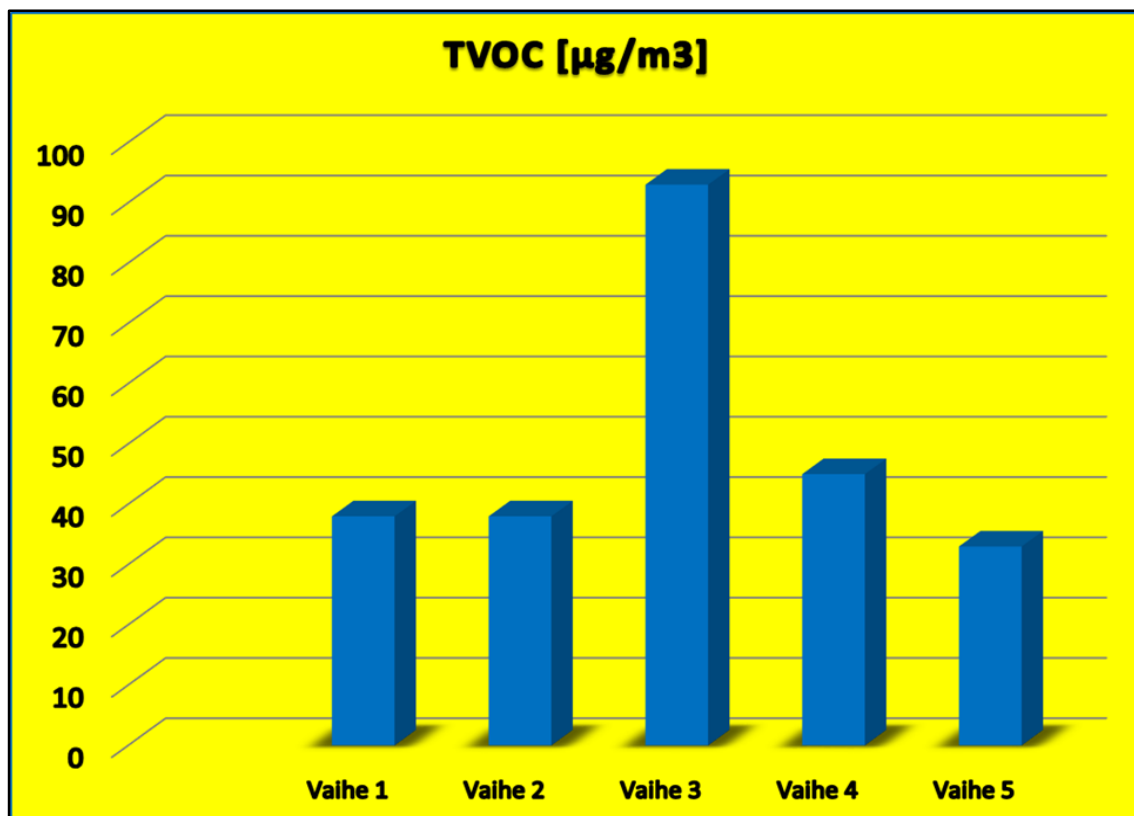
5.4.4.1 Pulssikoe 4.12.2014

Ensimmäinen onnistunut pulssikoe, johon saatiin kaikki halutut tutkimuslaitteet käyttöön, suoritettiin 4.12.2014. Kuvassa 43 on pulssikokeen kaikkien viiden eri vaiheen kromatogrammi.



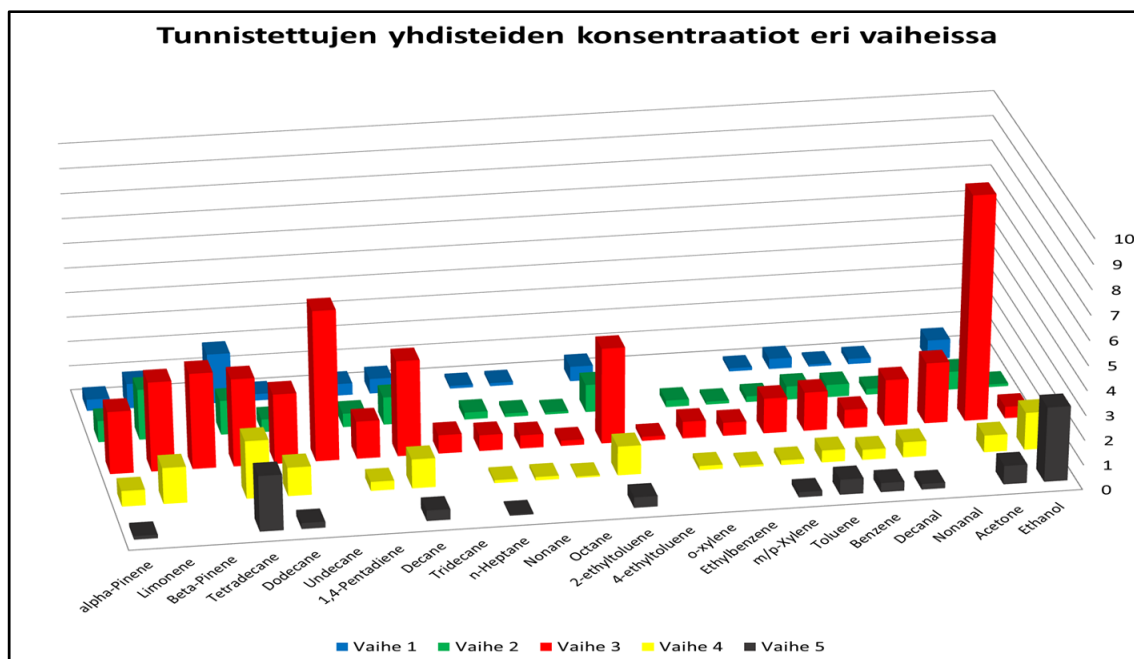
Kuva 43. Pulssikokeessa suoritettujen eri vaiheiden kromatogrammi. Pystyakselilla yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.

Tenax-adsorbettien analyysistä saatiin laskettua 4.12.2014 suoritettussa pulssikokeessa jokaiselle vaiheelle TVOC-arvot. Ulkoilman TVOC-taso oli $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mikä määritettiin vaiheen 5 mittauksista, ja suurin mitattu sisäilman arvo oli vaiheen 3 mittauksista, $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joka oli melkein kolme kertaa ulkoilmaa ja muita vaiheita korkeampi pitoisuus. Ilmanvaihdon ollessa suljettuna, TVOC-arvot eivät kasvaneet normaaliin käyttötilanteen mukaisista arvoista, vaan vaiheissa 1 ja 2 oli kaasumaisten orgaanisten yhdisteiden kokonaismääränä molemmissa $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sen sijaan huoneen ollessa ylipaineinen ja pelkän tuloilman vaikutuksen alainen, vaiheessa 4, TVOC-pitoisuudet olivat lievästi koholla, mutta ilmiöön saattoi vaikuttaa vielä vaiheesta 3 aiheutuneet VOC-yhdisteiden konsentraatioiden kasvu ja kontaminaatio. Kuvassa 44 on esitetty pylväsdiagrammi eri vaiheiden TVOC-tasoista.



Kuva 44. Eri Vaiheiden TVOC-tasot 4.12.2014 suoritettussa pulssikokeessa.

Huoneessa suoritettun kokeen eri vaiheiden tietyt yhdisteet ja niiden pitoisuuksien muutokset herättivät huomiota. Alla on esitetty kolmiulotteinen pylväsdiagrammi (kuva 45), johon on koottu tunnistettuja yhdisteitä, joiden pitoisuustasot nousivat eniten eri vaiheiden aikana.



Kuva 45. 4.12.2014 Suoritettussa pulssikokeessa tunnistettujen, pitoisuudeltaan merkittävimpien yhdisteiden pitoisuudet eri vaiheissa. Vaaka-akselilla yhdisteet ja pystyakselilla pitoisuudet [µg/m³]

Tutkimustuloksista poimittiin esille muutamia selkeitä poikkeamia yhdisteiden pitoisuuksissa eri vaiheissa mitatuista arvoista. Kuvasta 46 ilmenee asetonin pitoisuuden kasvu vaiheen 3 mittaustuloksessa. Asetoni-pitoisuus oli yli 10 kertaa korkeampi vaiheessa 3 verrattuna muiden vaiheiden tuloksiin. Lisäksi undekaania esiintyi vaiheen 3 mittauksissa peräti $6,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Undekaanin pitoisuutta ei pystytty detektoimaan muissa vaiheissa. Nonanaalin ja beta-pineenin arvot olivat huomattavasti nousseet vaiheessa 3, niiden ollessa $2,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Nonanal) ja $3,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Beta-Pinene). Muissa vaiheissa nonanaalia ja beta-pineeniä ei pystytty detektoimaan. Sen sijaan etanolin pitoisuus oli vaiheessa 5 korkeampi kuin missään muussa vaiheessa. Tuloksista tehtiin olettaus, että etanolin pitoisuus ulkoa sisälle virtaavassa ilmassa oli $3,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kun vaiheessa 4, tuloilman ollessa dominoivin lähde, sen arvo oli $1,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vaiheessa 3 pitoisuus oli $0,47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja vaiheissa 1 ja 2 sen pitoisuus jäi häviävän pieneksi. Vaiheen 3 etanolin korkeampi arvo verrattuna vaiheeseen 1 ja 2, selittyi todennäköisin perustein sillä, että vaiheessa 3 alipaine oli noin 20 Pa suhteessa ulkoilmaan ja rakenteiden läpi virtasi sisälle välittömässä läheisyydessä olevaa ulkoilmaa, mutta hyvin suuri osa huoneen sisälle vuotavasta ilmasta tuli myös ympäröivistä tiloista, joissa etanolin pitoisuudet olivat vähäisemmät, aivan kuten vaiheessa 1 mitatuissa arvoissa. Näin ollen tehtiin tulkinta, että etanolin lähde olisi jokin ulkona tai muissa lähirakennuksissa tapahtuva palamisreaktio tai moottoriajoneuvosta tuleva yhdiste eikä varsinaisesti tutkimuskohteen paikallinen lähde.



Kuva 46. Asetonin konsentraatio eri vaiheissa 4.12.2014 suoritetussa pulssikokeessa. Pystyakselilla on konsentraatio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ja vaaka-akselilla pulssikokeen vaiheet.

Taulukossa 13 on listattu Tenax TA näytteistä saatujen tulosten kaikki merkittävimmät kaasukromatografissa tunnistetut yhdisteet. Taulukosta voi havaita, että vaiheen 3 yhdisteitä detektoitiin huomattavasti enemmän verrattuna muihin vaiheisiin. Suurimmat poikkeamat 4.12.2014 suoritetun pulssikokeen eri tutkimusvaiheissa on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 13. Kaasukromatografista saadut Tenax-näytteiden tulokset 4.12.2014 tehdyssä pulssikokeessa. Tuloksissa vain detektoidut yhdisteet, jotka pystyttii selkeästi tunnistamaan tai joiden arvot olivat muita korkeampia.

Tutkimuksessa sisäilmasta tunnistetut ja merkittävimmät yhdisteet	Vaihe 1 [µg/m ³]	Vaihe 2 [µg/m ³]	Vaihe 3 [µg/m ³]	Vaihe 4 [µg/m ³]	Vaihe 5 [µg/m ³]
Etanoli		0,110	0,470	1,507	3,013
1-Butanoli			0,387	0,683	
Asetoni	0,780	0,732	9,115	0,683	0,749
2-Butanoni			0,168		
4-hydroksi-4-metyyli-2-pentanoni			1,299		
Nonanaali			2,456		
Heksanaali			0,461		
Dekanaali			1,870		
Bentseeni	0,092	0,503	0,756	0,413	
Tolueeni	0,418	0,542	1,565	0,487	
M/P-Ksyleeni			1,418		
Etyylibentseeni			0,535		
O-Ksyleeni			0,675		
4-Etyylitolueeni			0,168		
2-Etyylitolueeni			3,858		
Syklotrisiloksaani, heksametyyli	0,413	1,156	1,103		
Syklotetrasiloksaani, oktametyyli	0,284	0,521	0,532		
Syklopentasiloksaani, dekametyyli	0,120	3,124	3,489		
Oktanaali			0,215		
Nonaani			0,537		
Heptanaali			0,644		
Tridekaani			0,749		
Dekaani			3,858		
1,4-Pentadiene	0,471		1,512		
Heksaani			0,534		
Undekaani			6,069		
Dodekaani			2,818		
Tetradekaani			1,766		
β-Pineeni			3,858		
Limoneeni	0,599		3,610		
α-Pineeni	0,459		2,522		
3-Kareeni	0,428		2,667		

Taulukko 14. Kaasukromatografista saadut Tenax-näytteiden tulokset 4.12.2014 tehdyssä pulssikokeessa. Taulukossa on esitetty merkittävimmät muutokset eri yhdisteiden osalta.

Tutkimuksessa sisäilmasta tunnistetut ja merkittävimmät yhdisteet	Vaihe 1 [µg/m ³]	Vaihe 2 [µg/m ³]	Vaihe 3 [µg/m ³]	Vaihe 4 [µg/m ³]	Vaihe 5 [µg/m ³]
Etanoli	-----	0,110	0,470	1,507	3,013
1-Butanoli	-----	-----	0,387	0,683	-----
Asetoni	0,780	0,732	9,115	0,683	0,749
Tolueeni	0,418	0,542	1,565	0,487	-----
M/P-Ksyleeni	-----	-----	1,418	-----	-----
2-Etyylitolueeni	-----	-----	3,858	-----	-----
Syklotrisiloksaani, heksametyyli	0,413	1,156	1,103	-----	-----
Syklopentasiloksaani, dekametyyli	0,120	3,124	3,489	-----	-----
Dekaani	-----	-----	3,858	-----	-----
1,4-Pentadiene	0,471	-----	1,512	-----	-----
Undekaani	-----	-----	6,069	-----	-----
Dodekaani	-----	-----	2,818	-----	-----
Tetradekaani	-----	-----	1,766	-----	-----
β-Pineeni	-----	-----	3,858	-----	-----
Limoneeni	0,599	-----	3,610	-----	-----
α-Pineeni	0,459	-----	2,522	-----	-----
3-Kareeni	0,428	-----	2,667	-----	-----

5.4.5 Huoneen vuotoilman määrittäminen ja PM_{2.5}-pitoisuus sisäilmassa

Huoneen vuotoilman määrää, sekä sen vaikutuksia sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin, haluttiin arvioida siitä lähtökohdasta, että tutkittavassa huoneessa oli ilmennyt paineolosuhteiden mittauksissa jopa 38 Pa:n paine-eroja sisä- ja ulkoilman välillä. Vaikka nämä korkeammat paine-erot ajoittuivat enimmäkseen yöllä mitattuihin arvoihin, saattoivat sisätilassa muun muassa PM_{2.5}-pitoisuudet olla koholla vielä aamulla, jolloin työntekijöitä saapui työpaikalle. Pienhiukkasten konsentraatio tutkimuskohteessa ei kuitenkaan ollut seurantamittausten missään vaiheessa korkea, johtuen tulo- ja poistoilman suodatuksista sekä suhteellisen matalasta ulkoilman PM_{2.5}-tasosta.

Huoneen ilmavuotomäärä ja nimenomaan ulkoseinän läpi tulevan vuodon määrää eri paineolosuhteissa voidaan arvioida pulssikokeen tuloksista. Pulssikokeen tarkastellessa ulkoilman pienhiukkasmäärä saadaan testin loppuvaiheessa ikkunan avaamisen aikana saaduista mittaustuloksista, mikä antaa huoneelle tasetarkastelua varten raja-arvot. Huoneen massataseissa ja hiukkasmäärien tarkastelussa pyritään imupulssin avulla löytämään tasapainotila eli sellainen ajanhetki, jolloin tietyn imupaineen vaikutuksesta hiukkasmäärä huoneen sisällä on vakio ajan suhteen tai ainakin lähellä vakiota, jolloin tasapainotilan arvo pystytään laskennallisesti määrittämään ja suuria muutoksia ei enää synny pienhiukkasten konsentraatioiden osalta tutkittavan huoneen sisäilmassa.

Toimistohuoneessa tulee huomioda myös se, kuinka tutkittavan huoneen alipaineistaminen saa aikaiseksi paine-eroja tutkittavan tilan ja viereisten tilojen välille ja sitä kautta joudutaan määrittelemään, kuinka suuri osuus huoneen vuotoilmasta on peräisin rakennuksen sisäisistä ilmavirroista ja kuinka paljon ulkoa. Näitä asioita voidaan tarkastella pulssikokeesta saatujen tuloksien, huoneen ainepitoisuuksien ja sekoitusyhtälöiden avulla. Sekoitusyhtälöiden yhteydessä käytetyt kaavat ovat 14...19 alla olevan esityksen mukaisesti.

Massataseet:

$$\dot{m}_{vuoto} + \dot{m}_{sisäiset\ siirtymät} + \dot{m}_{tuotto} - \dot{m}_{poisto} = m \frac{dc}{dt} \neq 0 \quad (14)$$

epästationääritilassa

$$\dot{m}_{vuoto} + \dot{m}_{sisäiset\ siirtymät} + \dot{m}_{tuotto} - \dot{m}_{poisto} = 0 \text{ stationääritilassa} \quad (15)$$

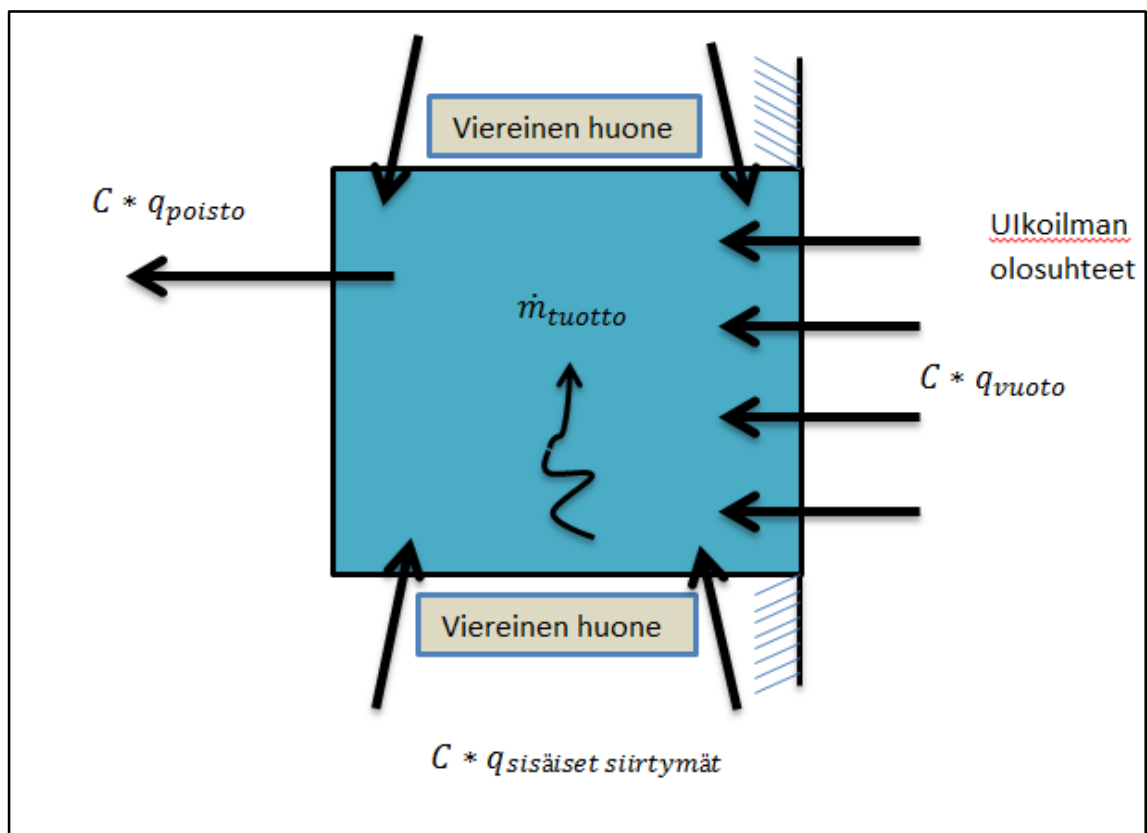
ja edelleen

$$C_{ulko} * q_{vuoto} + C_{sisä} * q_{sisäiset\ siirtymät} + \dot{m}_{tuotto} - C * q_{poisto} = m \frac{dc}{dt} \neq 0 \quad (16)$$

epästationääritilassa

$$C_{ulko} * q_{vuoto} + C_{sisä} * q_{sisäiset\ siirtymät} + \dot{m}_{tuotto} - C * q_{poisto} = 0 \quad (17)$$

stationääritilassa



Kuva 47. Periaatekuva tutkittavan huoneen massavirroista tuloilmakanavan ollessa suljettuna.

Suoritettaessa huoneen alipaineistusta sulkemalla tuloilmaventtiili, epästationääritilan massataseessa voidaan olettaa, että sisätilan pienhiukkasten määrä lisääntyy, kun ulkoilman hiukkasmäärä tilavuusosuutta kohden on korkeampi kuin toimistorakennuksen sisällä tarkasteluvaiheen alkuhetkellä. Lähtökohtana alipaineisen huoneen, jonka tuloilmakanava on suljettu, massataseelle pienhiukkasten massakonsentraatiota tarkastellessa on seuraavanlainen:

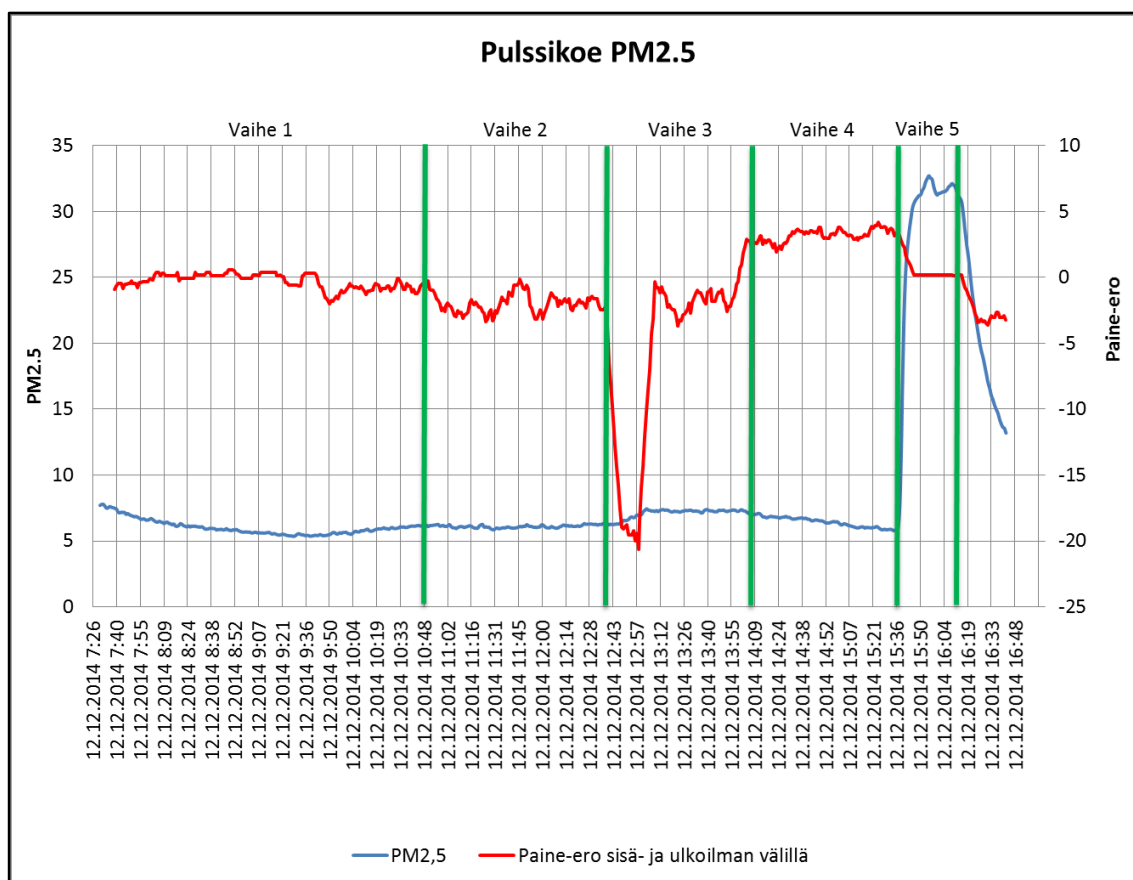
$$\dot{m}_{vuoto} + \dot{m}_{sisäiset\ siirtymät} + \dot{m}_{tuotto} - \dot{m}_{poisto} = m \frac{dc}{dt} > 0 \quad (18)$$

$$C_{ulko} * q_{vuoto} + C_{sisä} * q_{sisäiset\ siirtymät} + \dot{m}_{tuotto} - C * q_{poisto} > 0 \quad (19)$$

Ennen varsinaista pulssikoetta, joka suoritettiin online-mittausta hyväksikäyttäen, täytyi varmistua ilmanvaihtolaitteiden asetuksista ja huoneeseen virtaavien ilmamäärien tarkemmista arvoista. Anemometrillä tehdyissä mittauksissa huomattiin, että sekä imu- että poistoilmavirran määrät jakautuivat suuruusluokiltaan kahteen asetustasoon vuorokauden mittaisessa tarkastelussa. Ilmanvaihdon normaaliteho ajoittui aina kellonajalle 7:30 – 18:00, jonka ulkopuolella ilmanvaihto toimi pienemmällä teholla. Tämä piti ottaa huomioon muun muassa asetettaessa pulssikokeiden vaiheita sellaiseen kellonaikaan, jolloin ilmanvaihto toimi normaalisti.

5.4.5.1 Pulssikoe 12.12.2014

Eräs pulssikoe suoritettiin 12.12.2014, jolloin mittauksissa käytettiin online-mittaukseen tarkoitettuja laitteita, eikä tutkimuskohteessa suoritettu tänä ajankohtana Tenax TA näytteenottoa. Pulssikokeessa oli tarkoitus nähdä, kuinka pienhiukkasten kulkureitit muuttuivat eri vaiheissa ja miten nämä kulkureitit vaikuttivat sisäilman $PM_{2.5}$ -pitoisuuksiin. Lisäksi haluttiin arvioida tutkimuskohteen ilmanvuotoreitit perustuen tutkimustuloksista saatuihin pienhiukkasten pitoisuuksiin. Kuvassa 48 on pulssikokeen tulokset $PM_{2.5}$ -pitoisuuden ja paine-erojen osalta. Kuvassa vihreä pystyviiva rajaa kaikki pulssikokeen viisi eri vaihetta omaan ajalliseen tarkasteluun. Liitteiden kuvissa D1...D6, esitetään kunkin tutkimusvaiheen $PM_{2.5}$ -konsentraatiot, lukuun ottamatta vaihetta 1. Lisäksi kappaleen lopussa olevassa taulukossa 15 on esitetty imupulssivaiheen $PM_{2.5}$ -pitoisuudet minuutin aika-askeleella.



Kuva 48. Pulsikokeen $PM_{2.5}$ -pitoisuudet sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero 12.12.2014 suoritettua koesarjassa.

Pulssikokeen vaiheessa 1 sisäilman $PM_{2.5}$ - taso oli keskimäärin $5,7 \mu g/m^3$, kun tarkastelujaksoksi valittiin klo 8:30 ja 10:50 välinen aika. Tätä kellonaikaa edeltävät pienhiukkasten määrät ovat hieman koholla johtuen ilmanvaihtolaitteen yö-asetuksista ja siitä aiheutuvasta huoneen voimakkaammasta alipaineesta, minkä takia tarkastelu aloitettiin vasta klo 8:30. Vaiheen 2 $PM_{2.5}$ - taso oli keskimäärin $6,1 \mu g/m^3$, eikä huoneessa täten tapahtunut merkittävää muutosta vaiheeseen 1 verrattuna. Vaiheen 3 $PM_{2.5}$ -konsentraatio oli selkeästi lisääntymässä ja saavutti suurimman arvon $7,4 \mu g/m^3$ imupulssin loppuvaiheessa. Vaiheen 3 imupulssi oli kuitenkin liian lyhytkestoinen, eikä tuloksesta pystytty tarkasti näkemään mihin pitoisuuteen sisäilman pienhiukkasten konsentraatio asettuu. Vaiheessa 4 sisäilman $PM_{2.5}$ -pitoisuus lähti oletetusti laskuun, vaikka pitoisuuden väheneminen oli melko hidasta. Vaiheen 4 alussa pienhiukkasten konsentraatio oli noin $7,3 \mu g/m^3$ ja vaiheen 4 lopulla se oli $5,8 \mu g/m^3$, kun ylipaineen vaikutusaika oli noin 1,5 h. Tämän jälkeen siirryttiin vaiheeseen 5, jossa ulkoikkunat avattiin ja tuloilma suljettiin poistoilman ollessa päällä. Vaiheen 5 $PM_{2.5}$ -pitoisuudet asettuivat nopeasti lähelle arvoa $32 \mu g/m^3$, joka oletettiin ulkoilman pitoisuudeksi.

Vaiheessa 3, imupaineesta aiheutunut sisäilman pienhiukkasten konsentraation kasvu näkyy kuvan D3 mukaisesti aina siihen asti, kunnes poistoilma suljetaan, tuloilmakanava avataan ja huoneen alipaine heikkenee eli sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero pienenee. Imupulssi kesti noin 20 minuuttia ja kuvista D2 ja D3 voidaan arvioida, ettei kyseinen imuaika riitä edellä mainitun massataseen tasapainotilan saavuttamiseksi, huoneen alipaineistuksen ollessa liian vähäistä ja vähäkestoista. Mittausarvoista voidaan kuitenkin tehdä oletuksia jatkotutkimuksia varten, sekä asettaa väliarviot imuvaiheen tasapainotilan pienhiukkasmäärälle ja laskea, kuinka paljon imuaikaa pitäisi pidentää, jotta saadaan luotettavampaa informaatiota tasapainotilan konsentraatiosta, kun huone on selvästi alipaineinen.

Vuotoilman osuudet alipaineen aikana saatiin melko tarkasti arvioitua mittaustuloksista, kun ulkoilman ja ympäröivien tilojen pienhiukkasarvoiksi asetettiin tietyt vakiokonsentraatiot. Alipaineistuksen mittaustulosten avulla pyrittiin arvioimaan mihin tasapainotilaan huone asettuisi, minkä pituinen imuajan tulee olla varmemman arvion saamiseksi ja mitkä olisivat eri vuotoreittien ilmamäärien osuudet koko vuotoilmasta. Vuotoilmaa määritettäessä asetettiin ulkoilman pienhiukkasten raja-arvoksi $32 \mu g/m^3$ ja ympäröivien sisätilojen arvoksi $6,25 \mu g/m^3$, vaiheiden 1 ja 5 mittaustulosten perusteella. Kun ilman sekoittuminen tutkittavassa tilassa oletetaan täydelliseksi epäpuhtauspitoisuuden kasvaessa, pätee kaavat:

$$C_{\infty} - C = (C_{\infty} - C_0)e^{-nt} \quad (20)$$

$$C = C_{\infty} - (C_{\infty} - C_0)e^{-nt} \quad (21)$$

$$C_{\infty} = \frac{C - C_0 e^{-nt}}{1 - e^{-nt}}, \quad (22)$$

C_{∞} = huoneen tasapainotilan konsentraatio

C_0 = konsentraatio huoneessa alkuhetkellä

C = konsentraatio huoneessa hetkellä t

Imupulssia tutkittaessa arvioitiin mittausdatan perusteella tasapainotilan asettuvan arvoon $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kun huoneessa vallitsi noin 20 Pascalin alipaine ulkoilmaan nähden eli olosuhteet olivat vaiheen 3 mukaiset. Kuvasta D4 nähdään, kuinka laskenta-arvo myötäilee trendilinjaa imupulssin aikana. Mittaustulokset imupulssin alkuvaiheessa muuttuvat hitaasti, johtuen sisäilman sekoittumisen viiveestä ja tämän takia laskentatulokset alkavat noudattamaan mittaustuloksia vasta yli 10 minuutin jälkeen huoneen alipaineistuksen aloittamisesta, jolloin trendilinjan käyrän derivaatta muuttuu ajan suhteen väheneväksi teoreettisen oletuksen mukaisesti.

Taulukosta 15 nähdään, kuinka tasapainotilan konsentraatio asettuu lähelle arvoa $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kun tulokset on laskettu yllä olevilla kaavoilla mittaustulosten trendilinjan arvoista. Tässä tasapainotilan konsentraation arvot laskettiin trendilinjan arvoista, koska mittausdatassa oli liian paljon vaihtelua sekoittumisen epätäydellisyydestä johtuen. Pidemmällä mittausajalla trendilinja olisi tarpeeksi tarkka kuvaamaan konsentraation kehittymistä ja taulukosta 15 nähdään, kuinka laskentatulokset myötäilee trendilinjan arvoja. Kun mittausdatasta oli arvioitu tasapainotilan konsentraatioksi noin $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pystyttiin tuloksista arvioimaan vuotomäärät sisäisille siirtymille ja ulkoilman vuotoilmalle seuraavilla oletuksilla:

$$C_t * q_t - C_p * q_p = 0 \quad (23)$$

$$C_t * q_t = C_u * q_{vuoto} + C_{sis} * q_{sisäiset\ siirtymät} \quad (24)$$

$$q_t = q_{vuoto} + q_{sisäiset\ siirtymät} \quad (25)$$

Kaavojen 23...25 avulla saatiin arvioiduksi imupulssista aiheutuvat vuotoilman määrät ja vuotoreitit.

$$\frac{q_{vuoto}}{q_p} = \frac{C_p - C_{s.s.}}{C_u - C_{s.s.}} = 0,146$$

Pulssikokeen tuloksista saatiin määritettyä vuotomäärät sisäisille siirtymille ja ulkoseinän läpi tuleville ilmapirroille, missä poistoilmavirta oli noin $85 \text{ m}^3/\text{h}$ eli $23,6 \text{ l/s}$. Alipaineistuksen aikana noin 15 % vuotoilmasta tuli ulkoa julkisivun läpi tai muista epäjatkuvuuskohdista sisä- ja ulkoilman rajaamissa rakenteissa ja 85 % vuotoilmasta tuli ympäröivistä tiloista. Tämä tarkoittaa sitä, että huoneen ollessa noin 20 Pascalia alipaineinen, ulkoseinän läpi virtaa ulkoilmaa huoneeseen noin $3,5 \text{ l/s}$, kun taas ympäröivistä tiloista noin 20 l/s .

Vaiheessa 4 suoritettiin huoneen ylipaineistus, jotta nähtäisiin, miten pienhiukkasten konsentraatio vähenee, kun ilma vuotaa rakenteiden läpi pääosin huoneen sisältä ulospäin ja tuloilman lähteenä on vain tuloilmakanava. Myös tässä vaiheessa huomattiin mittausajan olevan riittämätön, sillä sisätilan pienhiukkasten konsentraatio vähenee tasaantumatta aina siihen asti, kunnes siirrytään vaiheeseen 5 ja ikkuna avataan, mistä saatiin ulkoilman arvo pienhiukkasille.

Liitteessä D kuvat D1, D2, D5 ja D6 esittävät vaiheiden 2, 3, 4 ja 5 tulokset luetellussa järjestyksessä ja taulukossa 15 on laskettu vaiheessa 3 olevan imupulssin aiheuttamaa $\text{PM}_{2.5}$ -pitoisuuden muutosta ja sen avulla arvioitavaa tasapainotilan pienhiukkasten konsentraatiota. Taulukossa 15 on mitattu $\text{PM}_{2.5}$ -pitoisuuden liukuva keskiarvo (trendilinja),

laskennallisesti arvioitu PM_{2.5}-pitoisuus minuutin aika-askeleella ja laskennallisesti arvioitu tasapainotilan konsentraatio C_{∞} . Kuvat D3 ja D4 ovat tarkentavia kuvia vaiheen 3 imupulssista. Kuvasta D4 nähdään mitatun PM_{2.5}-pitoisuuden liukuvan keskiarvon ja laskennallisen arvon välinen suhde.

Taulukko 15. Pulsikokeessa mitatun PM_{2.5}-pitoisuuden liukuva keskiarvo (trendilinja), laskennallisesti arvioitu PM_{2.5}-pitoisuus minuutin aika-askeleella ja laskennallisesti arvioitu tasapainotilan konsentraatio (C_{∞}) sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero vaiheessa 3, tarkastelujaksolla, jossa tutkimuskohde oli alipaineinen. Koesarja suoritettiin 12.12.2014.

Δt [h]	Δt [min]	PM2.5	Pres	Paine-ero	PM2.5 laskenta-ulos	PM2.5 trendilinja	C_{∞} , laskettu
0	1	6,31		-17,6	5,579393563	6,2719	
0,0167	2	6,24		-27,3	5,670928163	6,2595433	
0,0333	3	6,27		-17,05	5,760500845	6,2557676	
0,0500	4	6,25		-17,6	5,848153659	6,2600593	
0,0667	5	6,25		-18,95	5,933927754	6,2719049	
0,0833	6	6,28		-17,95	6,0178634	6,290791	
0,1000	7	6,3		-20,85	6,1	6,316204	
0,1167	8	6,28		-16,25	6,180376114	6,3476305	
0,1333	9	6,37		-20,3	6,259029477	6,3845569	
0,1500	10	6,43		-15,75	6,335997012	6,4264698	
0,1667	11	6,57		-18,75	6,411314854	6,4728556	
0,1833	12	6,54		-25,5	6,485018361	6,5232008	
0,2000	13	6,57		-15,7	6,557142134	6,576992	7,936905956
0,2167	14	6,63		-25,6	6,627720033	6,6337156	10,6326353
0,2333	15	6,78		-18,7	6,696785191	6,6928582	10,23707854
0,2500	16	6,83		-18,25	6,764370032	6,7539063	10,10524692
0,2667	17	6,77		-17,3	6,830506285	6,8163462	10,03934658
0,2833	18	6,81		-23,95	6,895224998	6,8796646	9,999818742
0,3000	19	6,97		-14,7	6,958556553	6,943348	9,973477157
0,3167	20	6,96		-27,7	7,020530684	7,0068828	9,954670567
0,3333	21	6,98		2,15	7,081176484	7,0697556	9,940573345
0,3500	22	7,01		0,15	7,140522424	7,1314528	9,929615696
0,3667	23	7,24		0,15	7,198596365	7,1914609	9,920855744
0,3833	24	7,33		-2,35	7,255425571	7,2492665	9,913694111
0,4000	25	7,44		0,15	7,311036721	7,304356	9,907731213
0,4167	26	7,35		-1,85	7,365455921	7,356216	9,902690413
0,4333	27	7,33		-1,95	7,418708721	7,4043329	9,898374115

Huoneessa tehdyssä pulssikokeessa imupulssin aikaansaama alipaine oli keskimäärin noin 20 Pascalia, kun taas ylipaineekokeessa huone oli keskimäärin 3 Pascalia ylipaineinen ulkoilmaan nähden. Alipaineessa saadut mittaustulokset antavat osviittaa siitä mihin pienhiukkasten konsentraation määrä voi nousta saavuttaessa tasapainotilan, mutta ylipaineekokeessa ei pystytä tekemään varmoja johtopäätöksiä muutoksen ollessa hyvin hidadasta. Kuitenkin ylipaineekokeessa nähdään selvästi, kuinka PM_{2.5}:n konsentraatio pienee ajan funktiona tuloilman ollessa ns. puhtaampaa kuin vuotoilman.

Vuotofunktioiden määrittämisessä olisi hyvä nähdä myös imupulssin alipaineesta saatu tasapainotilan sisäilman konsentraation tarkka arvo, sekä ylipaineekokeen tasapainotilan konsentraation tarkempi arvio, mutta ongelmaksi muodostuu liian pitkä mittausväli ylipaineekokeessa. Tasapainotilan saavuttamiseksi ylipaineessa kestää useita tunteja, jona ai-

kana ulkoilman hiukkasmäärät ovat saattaneet muuttua jo merkittävästi. Tarkempien arvojen saamiseksi olisi näin ollen hyvä saada tutkittavan huoneen painesuhteita muutettua radikaalimmin, jotta mittausaika pienentyisi.

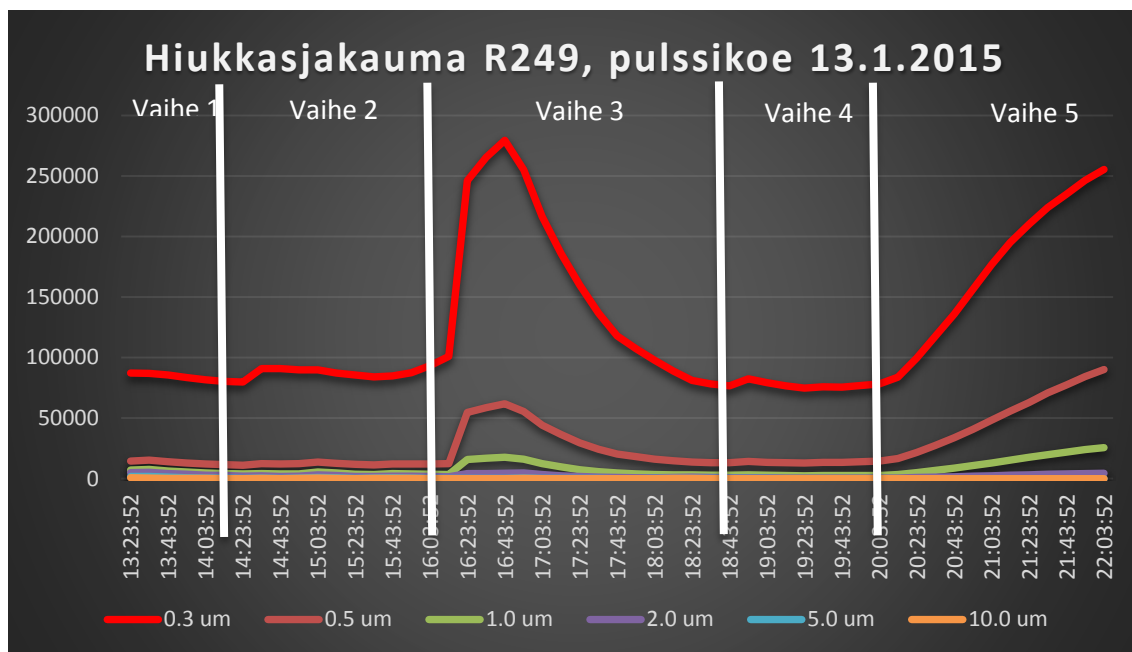
Alla on laskettu aika, joka vaaditaan 20 Pascalin alipaineessa olevan huoneen tasapainotilan saavuttaminen 95 prosenttisesti.

$$t_{95\%} = -\frac{\ln \frac{0,05C_{\infty}}{C_{\infty}-C_0}}{n} = 1h\ 32min$$

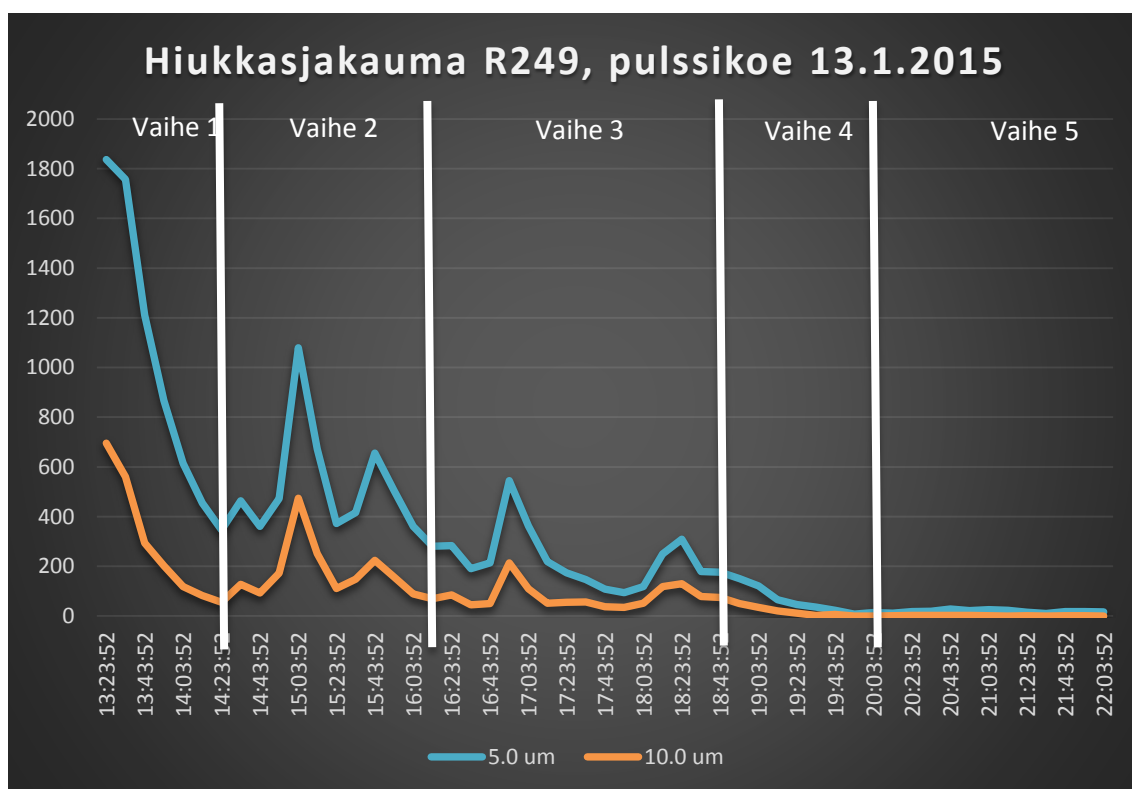
Laskelman mukaan 95 %:n saavuttaminen alipaineistusvaiheen tasapainotilasta toteutuu, kun imuaika on vähintään puolitoista tuntia. Kahden tunnin imuajalla saataisiin varmistus yllä esitettyihin arvioihin vuotoilman reiteistä ja määristä. Pulssikokeen vaiheessa 4 mitatut arvot, missä tuloilma oli dominoivin lähde, jäivät epätarkoiksi johtuen liian pienestä tuloilmavirrasta. Kyseisessä vaiheessa oli tarkoitus selvittää tuloilmasta aiheutuva pienhiukkasten määrän muutos, mutta tutkimustuloksien tarkastelussa tultiin siihen päätelmään, että PM_{2.5} -pitoisuudet olisi syytä mitata suoraan tuloilmakanavasta tai tuloilmasta kerätystä ilmamassasta. Pulssikokeen tuloksista voitiin kuitenkin päätellä, että tuloilman pienhiukkasten pitoisuus oli huomattavasti alhaisempi kuin ulkoilmassa oleva pitoisuus.

5.4.5.2 Pulssikoe 13.1.2015

Hiukkasjakaumaa haluttiin tutkia pulssikokeen yhteydessä. Tämän kaltainen tutkimus järjestettiin 13.1.2015, missä pulssikokeen eri vaiheissa tutkittiin aerodynaamiselta halkaisijaltaan erikokoisten hiukkasten konsentraatiota tutkimuskohteen sisäilmassa. Kuvassa 49 on suhteellinen asteikko hiukkasten kappalemäärän pitoisuudesta tiettyä ilmatilavuutta kohden. Tutkimustuloksista ilmeni sisäilman hiukkaspitoisuuden korreloivan voimakkaasti ulkoilman tasoon. Kappalemäärältään tutkimuskohteen sisäilmassa esiintyi ylivoimaisesti eniten aerodynaamiselta halkaisijaltaan lähellä 0,3 µm:n kokoisia hiukkasia ja toiseksi eniten 0,5 µm:n kokoisia hiukkasia. Tuloksista kyettiin päättelemään, että ulkoilmassa esiintyi huomattavasti enemmän pienikokoisia hiukkasia verrattuna karkeampiin hiukkasiin. Kuvasta 50 nähdään, etteivät yli 2 µm:n kokoisten hiukkasten pitoisuus sisäilmassa kasvanut ulkoilman ollessa dominoivin lähde, vaan sitä vastoin pieneni. Tämän pulssikokeen tuloksista voidaan päätellä, että karkeampien hiukkasten esiintymiseen sisäilmassa saattaa vaikuttaa eniten sisäpuoliset tekijät, eikä ulkoilman hiukkasmäärät.



Kuva 49. Hiukkasjakauma tutkimuskohteessa suoritetussa pulssikokeessa 13.1.2015. Kuvassa eri kokoisten hiukkasten pitoisuudet on ilmaistu kappalemäärinä tiettyä ilmatilavuutta kohden.



Kuva 50. Karkeampien hiukkasten käyttäytyminen tutkimuskohteessa suoritetussa pulssikokeessa 13.1.2015. Kuvassa esiintyvät 5 μm:n ja 10 μm:n kokoisten hiukkasten pitoisuudet on ilmaistu kappalemäärinä tiettyä ilmatilavuutta kohden.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä diplomityössä tehtiin sisäilman laadun mittauksia ja selvitettiin fysikaalisten olosuhteiden vaikutuksia sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Tutkimuskohteena oli toimistorakennuksen työhuone, jossa työskenteli yksi henkilö. Fysikaalisista olosuhteista perehdyttiin sisäilman lämpötilan, kosteuden sekä sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron tarkasteluun. Sisäilman epäpuhtauksia tutkittaessa tärkeimmät tutkimukset kohdistuivat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC), pienhiukkasten (PM_{2.5}) ja hiilidioksiditason mittauksiin. Tutkimuskohteen hiilidioksiditasoa ei kuitenkaan tarkasteltu epäpuhtauspitoisuuden näkökulmasta, vaan lähinnä arvioitaessa ilman vaihtuvuutta ja ilmanvaihdon tehokkuutta.

Olosuhteiden seurannan lisäksi tutkimuskohteessa tehtiin koesarjoja, jotka saivat nimekseen pulssikoe. Tätä viisiosaista tutkimusmetodia haluttiin kokeilla siitä lähtökohdasta, että löydettäisiin nopeatoiminen tutkimusmetodi, joka tarjoaisi mahdollisimman paljon informaatiota sisätilan käyttäytymisestä erilaisissa koestusolosuhteissa ja täten parantaisi ajallisesti tutkimustiedon hankintaa, kun tutkimuskohteesta halutaan saada nopeasti informaatiota. Pulssikokeesta saatujen tulosten perusteella paineolosuhteiden vaikutusta sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin pystyttiin hyödyntämään muun muassa määriteltäessä tutkittavan tilan ilmanvuotoreittejä.

Tutkimuksien yhteydessä oli tärkeää löytää syy-yhteys sisäilman fysikaalisten tekijöiden ja epäpuhtauspitoisuuksien välille, jotta kyseisiä ilmiöitä olisi mahdollista ennakoida tai laskennallisesti mallintaa tulevia tutkimuksia tai muita käyttötarkoituksia varten. Tutkimusmenetelmät ovat käytännönläheisiä ja ne ovat helposti jalostettavia, mikä tarjoaa erinomaiset mahdollisuudet jatkotutkimuksille ja jo olemassa olevien tutkimusmenetelmien yhteensovittamiselle ja lisäkehittämiseksi. Mahdollisia pulssikokeen jalostuskeinoja olisivat kenttäkokeiden tarkentuvat analyysit, vaativien kohteiden tutkimusmenetelmien kehittäminen ja tutkittavien tilojen kokonaisvaltaisen käyttäytymisen mallintaminen. Jatkojalostettua versiota pulssikokeesta olisi mahdollista käyttää muun muassa tiivistyskorjauskohteissa korjauksen onnistumisen arvioinnissa.

Tutkimuksissa suoritettut pulssikokeet olivat vielä kokeiluvaiheessa, mutta kyseisen tutkimusmenetelmän osoitti vahvuutensa antaen nopealla aikataululla oleellista informaatiota tutkittavan huonetilan sisäilman fysikaalisesta käyttäytymisestä ja mahdollisten terveydelle haitallisten epäpuhtauksien kulkureittien selvittämisessä. Mittauksien yhteydessä kerättiin ajankohtaista tietoa sisä- ja ulkoilman olosuhteista ja pyrkimyksenä oli löytää yhteys ainepitoisuuksien ja olosuhteiden vaihteluille, joista erityisesti paine-erojen vaikutusta hyödynnettiin mahdollisten epäpuhtauslähteiden tai -reittien paikantamisessa ja toteamisessa.

Nykypäivänä on erittäin tärkeää saada nopeasti informaatiota sisäilmaongelman rakennuksen epäpuhtauksien määrästä ja laaduista, mutta ennen kaikkea niiden lähteistä, kun ryhdytään selvittämään sisäilmaongelman rakennuksen luonnetta ja laajuutta. Nimenomaan siihen perustavanlaatuisen ongelmaan, eli epäpuhtauslähteen paikantamiseen, on tulevaisuudessa tarvetta löytää ratkaisuja ja hyviä tutkimusmenetelmiä, jotta korjausrakentamisessa saavutettaisiin haluttu lopputulos ilman suuria takaiskuja ja epäonnistumisia sekä toivotulla aikataululla. Sen takia myös tämän tutkimuksen tutkimusmenetelmien eteenpäin vieminen ja kehittäminen sekä vastaavanlaisista kokeista saatavien tulosten analysoinnin parantaminen olisi tulevaisuudessa tärkeää.

Pulssikokeesta saatiin arvokasta informaatiota myös toimistohuoneen rakennusfysikaalisesta käyttäytymisestä ja ilmanvuotoreiteistä. Huoneen ilmavuotomäärät ja nimenomaan ulkoseinän läpi tulevan vuodon määrää eri paineolosuhteissa voitiin arvioida pulssikokeen tuloksista. Toimistohuoneessa tuli huomioda myös se, kuinka tutkittavan huoneen alipaineistaminen sai aikaiseksi paine-eroja tutkittavan tilan ja viereisten tilojen välille. Tämän perusteella määritettiin, kuinka suuri osuus huoneen vuotoilmasta oli peräisin rakennuksen sisäisistä ilmavirroista sekä kuinka paljon ilmaa virtasi suoraan ulkorakenteiden läpi. Näitä asioita oli mahdollista arvioida pulssikokeesta saatujen tuloksien, huoneen eri yhdisteiden ja epäpuhtauksien pitoisuustasojen ja huoneilman eri fysikaalisten tekijöiden laskennallisten tarkastelujen avulla.

7 Lähteet

Aalto, A., 2009. HTP-arvot 2009: haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. *Sosiaali-ja terveystieteiden tutkimuskeskus julkaisu*: 2009: 11.

Alaviippola, B. and Pietarila, H., 2011. *ILMANLAADUN ARVIOINTI SUOMESSA, PIENHIUKKASPITOISUUDET (PM_{2,5})*. Helsinki: Ilmatieteen laitos - ilmanlaadun asiantuntijapalvelut.

Berglund, B., Clausen, G., Ceaurriz, J.D., Kettrup, A., Lindvall, T., Maroni, M., Mølhave, L., Pickering, A., Risse, U. and Rothweiler, H., 1997. *Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in indoor air quality investigations: European Collaborative Action*.

Berglund, B., Johansson, I. & Lindvall, T., 1982. The influence of ventilation on indoor/outdoor air contaminants in an office building. *Environment international*, 8(1-6), pp. 395-399.

Bluyssen, P.M., 2013. *The indoor environment handbook: How to make buildings healthy and comfortable*. Routledge.

Bornehag, C., 1996. Pattern analysis of VOC in indoor air. *SP RAPPORT-STATENS PROVNINGSSANSTALT*, pp. 219-224.

Braniš, M., Rezáková, P. and Domasová, M., 2005. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom. *Environmental research*, 99(2), pp. 143-149.

Brown, S., Sim, M.R., Abramson, M.J. and Gray, C.N., 1994. Concentrations of volatile organic compounds in indoor air—a review. *Indoor air*, 4(2), pp. 123-134.

Chiang, C. & Lai, C., 2002. A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan. *Building and Environment*, 37(4), pp. 387-392.

Clancy, L., Goodman, P., Sinclair, H. & Dockery, D.W., 2002. Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. *The lancet*, 360(9341), pp. 1210-1214.

Crump, D.R., Squire, R.W., & YU, C.W.F., 1997. Sources and concentrations of formaldehyde and other volatile organic compounds in the indoor air of four newly built unoccupied test houses. *Indoor and Built Environment*, 6(1), pp. 45-55.

Deng, Q., Yang, X. & Zhang, J.S., 2012. Key factor analysis of VOC sorption and its impact on indoor concentrations: The role of ventilation. *Building and Environment*, 47(1), pp. 182-187.

Dockery, D.W., Pope, C.A., XU, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris jr, B.G. & Speizer, F.E., 1993. An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England journal of medicine*, 329(24), pp. 1753-1759.

Donaldson, K., Stone, V., Seaton, A. & Macnee, W., 2001. Ambient particle inhalation and the cardiovascular system: potential mechanisms. *Environmental health perspectives*, 109 Suppl 4, pp. 523-527.

Edwards, R.D., Jurvelin, J., Saarela, K. & Jantunen, M., 2001. VOC concentrations measured in personal samples and residential indoor, outdoor and workplace microenvironments in EXPOLIS-Helsinki, Finland. *Atmospheric Environment*, 35(27), pp. 4531-4543.

Fang, L., 1998. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor air*, 8(2), pp. 80-90.

Fang, L., Wyon, D.P., Clausen, G. & Fanger, P.O., 2004. Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance. *Indoor Air, Supplement*, 14(SUPPL. 7), pp. 74-81.

Fanger, P.O., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*, .

Flannigan, B. & Morey, P., 1996. *Rakennusten kosteus- ja homevaurioiden torjunta*. Helsinki: Sisäilmayhdistys.

Hänninen, O. & Asikainen, A., 2013. *Efficient reduction of indoor exposures-Health benefits from optimizing ventilation, filtration and indoor source controls*. 2. Tampere: THL.

He, C., Morawska, L., Hitchins, J. & Gilbert, D., 2004. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment*, 38(21), pp. 3405-3415.

Hekkanen M., 2006. Kosteus- ja homeongelmien havaitseminen, korjaus ja ehkäisy kuntien rakennuksissa. Helsinki: Kuntaliitto.

Hiltunen, K., 2000. *Sisäilman ammoniakki suomalaisissa asunnoissa*. Helsinki: Helsingin kaupungin ympäristökeskus.

Holmijoki, O., 2013. *Korjausrakentaminen Suomessa. RAKENNUSTEKNISET KUSTANNUKSET*. Helsinki: Työterveyslaitos.

Holopainen, R. & Reijula, K., 2012. Kosteusvaurioiden vähentäminen rakennuksissa: Talotekniikkajärjestelmät rakennusten kosteusvaurioiden aiheuttajina.

Järnström, H. & Saarela, K., 2005. *Muovimattopinnoitteisen lattiarakenteen VOC-emisiot sisäilmaongelmatapauksissa*. Espoo: VTT.

Jokl, M.V., 2003. Indoor Air Quality Assessment Based on Human Physiology – Part 1. New Criteria Proposal. 43.

Kauppinen, T., Hanhela, R., Kandolin, I., Karjalainen, A., Kasvio, A., Perkiö-Mäkelä, M., Priha, E., Toikkanen, J. & Viluksela, M., 2010. Työ ja terveys Suomessa 2009. *Helsinki: Työterveyslaitos*, .

Kauppinen, T., Kovanen, K., Nykänen, V., Nyman, M., Paiho, S., Peltonen, J., Pietiläinen, J., Pihala, H. & Kalema, T., 2006. Rakennusten toimivuuden varmistaminen energiatehokkuuden ja sisäilmaston kannalta. *VTT Tiedotteita*, .

Korhonen, E., 2011. Puhtauspalvelut ja työympäristö: ostettujen siivouspalveluiden laadun mittausmenetelmät ja laatu sekä siivouksen vaikutukset sisäilman laatuun, tilojen käyttäjien kokemaan terveyteen ja työn tehokkuuteen toimistorakennuksissa.

- Kuwabara, Y., Alexeeff, G.V., Broadwin, R. & Salmon, A.G., 2007. Evaluation and application of the RD50 for determining acceptable exposure levels of airborne sensory irritants for the general public. *Environmental health perspectives*, 115(11), pp. 1609-1616.
- Lampinen, M.J., El Haj Assad, M., Kotiaho, V., Saari, K. & Wikstén, R., 2009. *Teknillinen termodynamiikka, Raportti 158*. Otaniemi: Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos.
- Liu, Z., Ye, W. & Little, J.C., 2013. Predicting emissions of volatile and semivolatile organic compounds from building materials: A review. *Building and Environment*, 64, pp. 7-25.
- Logue, J.M., McKone, T.E., Sherman, M.H. & Singer, B.C., 2011. Hazard assessment of chemical air contaminants measured in residences. *Indoor air*, 21(2), pp. 92-109.
- Mansukoski, M., 2013. *Epämääräisestä oireilusta ympäristösairauteen. Sisäilmasta sairastuminen lääketieteellisenä kiistana*, Helsingin yliopisto, Valtiotieteellinen tiedekunta, Sosiaalitieteiden laitos.
- Meklin, M., Putus, T., Hyvärinen, T., Haverinen-Shaughnessy, U., Lignell, U., Nevalainen, A. 2008. *Koulurakennusten kosteus- ja homevauriot: opas ongelmien selvittämiseen*. KTL:n julkaisu C 2/2008. Kansanterveyslaitos
- Morawska, L., Jayaratne, E.R., Mengersen, K., Jamriska, M. & Thomas, S., 2002. Differences in airborne particle and gaseous concentrations in urban air between weekdays and weekends. *Atmospheric Environment*, 36(27), pp. 4375-4383.
- Olesen, B.W., 2007. The philosophy behind EN15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. *Energy and Buildings*, 39(7), pp. 740-749.
- Pekkanen, J., 2004. Kaupunki-ilman pienhiukkasten terveysvaikutukset. *DUODECIM.*, 120, pp. 1645-1652.
- Penttinen, P., Timonen, K.L., Tiittanen, P., Mirme, A., Ruuskanen, J. & Pekkanen, J., 2001. Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics. *European Respiratory Journal*, 17(3), pp. 428-435.
- Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K. & Thurston, G.D., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), pp. 1132-1141.
- Pope III, C.A. & Dockery, D.W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(6), pp. 709-742.
- Ratcliffe, M. & Day, T., 2003. Improving office staff productivity while reducing carbon dioxide emissions, *Proceedings of CIBSE/ASHRAE Conference 2003*, pp. 24-26.
- Reijula, K., Ahonen, G., Alenius, H., Holopainen, R., Lappalainen, S., Palomäki, E. & Reiman, M., 2012. *Rakennusten kosteus- ja homeongelmat*. Espoo: Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012.
- Riipinen, I. & Lehtipalo, K., 15.6.2015, 2015, Hiukkaskäsikirja. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos, Ilmatieteiden ja geofysiikan osasto, [Verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.hiukkastieto.fi>.

RIL 250-2011, 2011. *KOSTEUDENHALLINTA JA HOMEVAURIoidEN ESTÄMINEN*. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Riley, W.J., McKone, T.E., Lai, A.C.K. & Nazaroff, W.W., 2002. Indoor particulate matter of outdoor origin: Importance of size-dependent removal mechanisms. *Environmental Science and Technology*, 36(2), pp. 200-207.

Rohr, A.C., Weschler, C.J., Koutrakis, P. & Spengler, J.D., 2003. Generation and quantification of ultrafine particles through terpene/ozone reaction in a chamber setting. *Aerosol Science & Technology*, 37(1), pp. 65-78.

Rundt, A., Backlund, P. & Paakkola, K., 2005. Sisäilman hajut ja orgaaniset epäpuhtaudet. *Työterveyslääkäri [verkkolehti] no, 23*, pp. 156-163.

Saldiva, P.H., Clarke, R.W., Coull, B.A., Stearns, R.C., Lawrence, J., Murthy, G.K., Diaz, E., Koutrakis, P., Suh, H. & Tsuda, A., 2002. Lung inflammation induced by concentrated ambient air particles is related to particle composition. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 165(12), pp. 1610-1617.

Salo, J., 2014. *Rakennuksen homeiden aineenvaihduntatuotteiden mittaamiseen perustuvan analytiikan kehittäminen*, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Salonen, H., Lappalainen, S., Lahtinen, M., Holopainen, R., Palomäki, E., Koskela, H., Backlund, P., Niemelä, R., Pasanen, A. & Reijula, K., 2011a. *Toimiston sisäilmaston tutkiminen*. Helsinki: Työterveyslaitos.

Salonen, H., Lappalainen, S., Lahtinen, M., Nevala, N., Lehtelä, J., Knibbs, L., Morawska, L. & Reijula, K., 2011b. Sisäympäristön parantava ja elvyttävä vaikutus hyvinvointipalvelutiloissa. *Post doc-tutkimustyö*. Helsinki: Työterveyslaitos. Brisbane: Queensland University of Technology.

Salonen, H.J., Pasanen, A.L., Lappalainen, S.K., Riuttala, H.M., Tuomi, T.M., Pasanen, P.O., Bäck, B.C. & Reijula, K.E., 2009. Airborne concentrations of volatile organic compounds, formaldehyde and ammonia in Finnish office buildings with suspected indoor air problems. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6(3), pp. 200-209.

Salthammer, T., Mentese, S. & Marutzky, R., 2010. Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical reviews*, 110(4), pp. 2536-2572.

Säteri, J., 1.12.2008, Sisäilmastoluokitus 2008, sisäympäristön uudet tavoitearvot Sisäilmayhdistys ry., [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://whm12.louhi.net/~sisailma/wp-content/uploads/2013/03/sisailmastoluokitus2008-esittely.pdf> [12/1, 2008].

Säteri, J. & BACKMAN, H., 14.3.2012, Sisäilmastoseminaari 2012, Sisäilmayhdistys ry., [Verkkodokumentti]. Saatavissa: http://whm12.louhi.net/~sisailma/wp-content/uploads/2013/06/sem2012_raportti-nettiin.pdf.

Seppänen, O., 2004. *Ilmastoinnin suunnittelu*. Talotekniikka-julkaisut.

Seppänen, O., Fisk, W.J. & Faulkner, D., 2004. Control of temperature for health and productivity in offices. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

Seppänen, O., Fisk, W.J. & Lei, Q.H., 2006. Ventilation and performance in office work. *Indoor air*, 16(1), pp. 28-36.

Seppänen, O.A., 1999. Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor air*, 9(4), pp. 226-252.

SFS-EN ISO 7730, 2006. Lämpöolojen ergonomia. lämpömukavuuden analyttinen määrittäminen ja tulkinta käyttäen laskettuja PMV- ja PPD-indeksejä sekä paikallista lämpömukavuutta.

Simon, M. & Butala, V., 2004. The influence of indoor environment in office buildings on their occupants: Expected-unexpected. *Building and Environment*, 39(3), pp. 289-296.

Sisäilmayhdistys, 2009. *Sisäilmastoluokitus 2008*. Espoo: Sisäilmayhdistys, Rakennustietosäätiö.

Sisäilmayhdistys, 2008, Ilmavirtaukset rakennuksessa, Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat, Sisäilmayhdistys ry., [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/kosteustekninen-toiminta/ilmavirtaukset-rakennuksessa/>.

Sjöberg, A., 2001. *Secondary emissions from concrete floors with bonded flooring materials-effects of alkaline hydrolysis and stored decomposition products*. Chalmers University of Technology.

STM, 2015. *Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista*. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö.

STM, 2008. *Asumisterveysopas Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeen (STM:n oppaita 2003:1) soveltamisopas*. Pori: Ympäristö ja Terveys -lehti.

STM, 2003. *Asumisterveysohje: asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät*. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö.

Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W.W., Cain, W.S., Fisk, W.J., Grimsrud, D.T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily, A. & Pickering, A., 2011. Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor air*, 21(3), pp. 191-204.

TTL, 28.04.2010, Ammoniakki, Työterveyslaitos, [Verkkodokumentti]. Saatavissa: http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/sisailma_ja_sisaymparisto/sisaymparistotekijat/sisailman_epapuhautudet/ammoniakki/Sivut/default.aspx.

Vahtolampi, J. & Murto-orava, L., 2011, Tilastoja rakennuskannasta, Ympäristöministeriö ja Museovirasto, [Verkkodokumentti]. Saatavissa: http://www.rakennusperinto.fi/kulttuuriymparisto/aikakaudet/fi_FI/tilastoja_rakennuskannasta/.

Vainio, T., Jaakkonen, L., Nippala, E., Lehtinen, E. & Isaksson, K., 2002. *Korjausrakentaminen 2000-2010*. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Tilastokeskus.

Vallius, M., Lanki, T., Tiittanen, P., Koistinen, K., Ruuskanen, J. & Pekkanen, J., 2003. Source apportionment of urban ambient PM 2.5 in two successive measurement campaigns in Helsinki, Finland. *Atmospheric Environment*, 37(5), pp. 615-623.

Villberg, K., Saarela, K., Tirkkonen, T., Pasanen, A., Kasanen, J., Pasanen, P., Kallio-koski, P., Mussalo-Rauhamaa, H., Malmberg, M. & Haahtela, T., 2004. *Sisäilman laadun hallinta*. VTT.

Vinha, J., 2014. *Rakennusfysiikka. 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto.

WHO, 2009. *Dampness and mould*. Copenhagen: WHO guidelines for indoor air quality.

Wirtanen, L., 2006. *Influence of moisture and substrate on the emission of volatile organic compounds from wall structures*. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Wolkoff, P., 1998. Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products. *Atmospheric Environment*, 32(14-15), pp. 2659-2668.

Wolkoff, P., Wilkins, C.K., Clausen, P.A. & Nielsen, G.D., 2006. Organic compounds in office environments - Sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry. *Indoor air*, 16(1), pp. 7-19.

Wong, L.T., Mui, K.W. & Hui, P.S., 2008. A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices. *Building and Environment*, 43(1), pp. 1-6.

World Health Organization, 2003. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide: report on a WHO working group, Bonn, Germany 13-15 January 2003.

World Health Organization, 1989. Indoor air quality: organic pollutants.

Ye, W., Won, D. & Zhang, X., 2014. A preliminary ventilation rate determination methods study for residential buildings and offices based on VOC emission database. *Building and Environment*, 79, pp. 168-180.

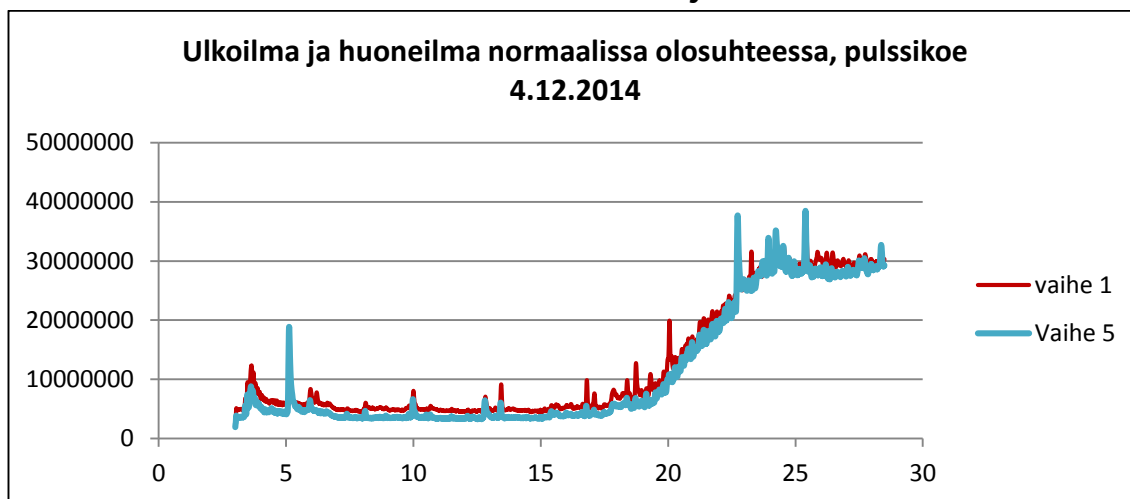
Ympäristöministeriö. 2010. Suomen Rakentamismääräyskokoelma SRMK, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet.

Ympäristöministeriö. 2003. Suomen Rakentamismääräyskokoelma SRMK, osa C4: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet.

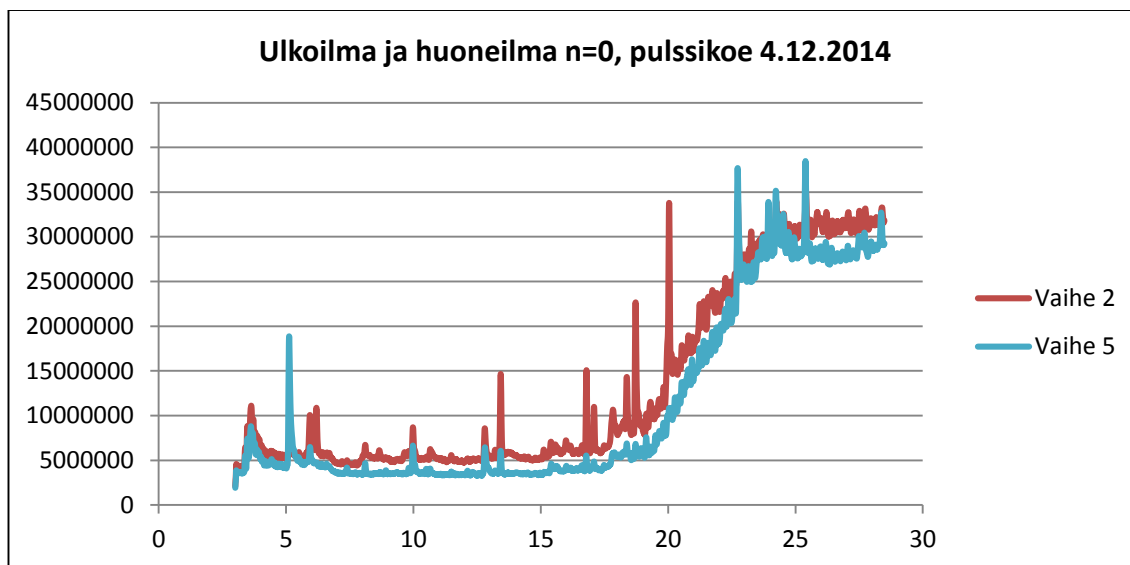
Yu, C.W.F. and Kim, J.T., 2010. Building pathology, investigation of sick buildings VOC emissions. *Indoor and Built Environment*, 19(1), pp. 30-39.

8 Liitteet

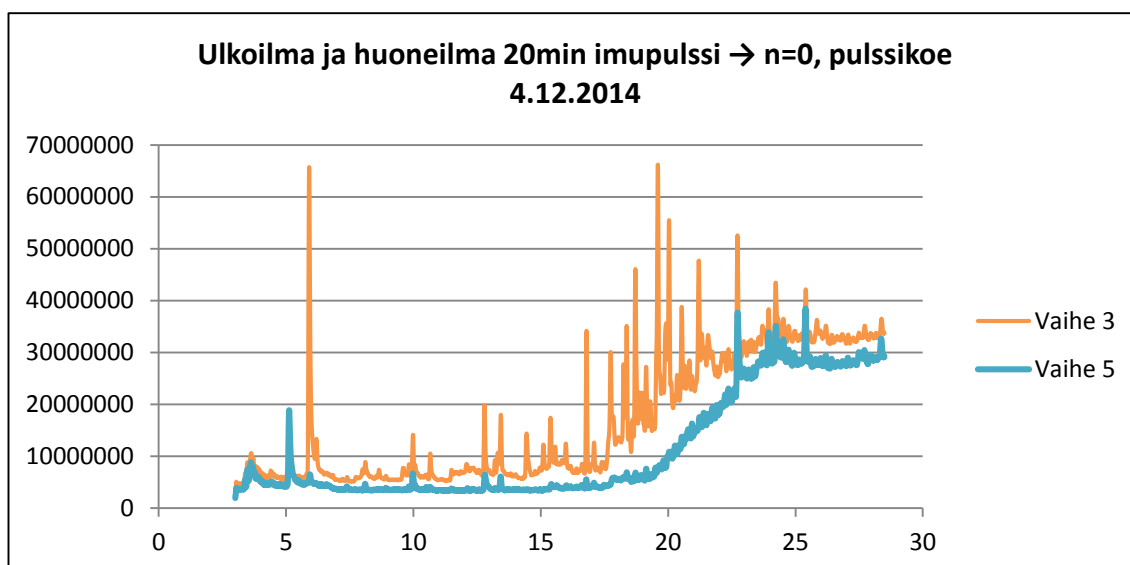
Liite A. Pulssikokeen yhteydessä suoritettujen Tenax-näytteiden tulokset 4.12.2014 suoritettussa koesarjassa.



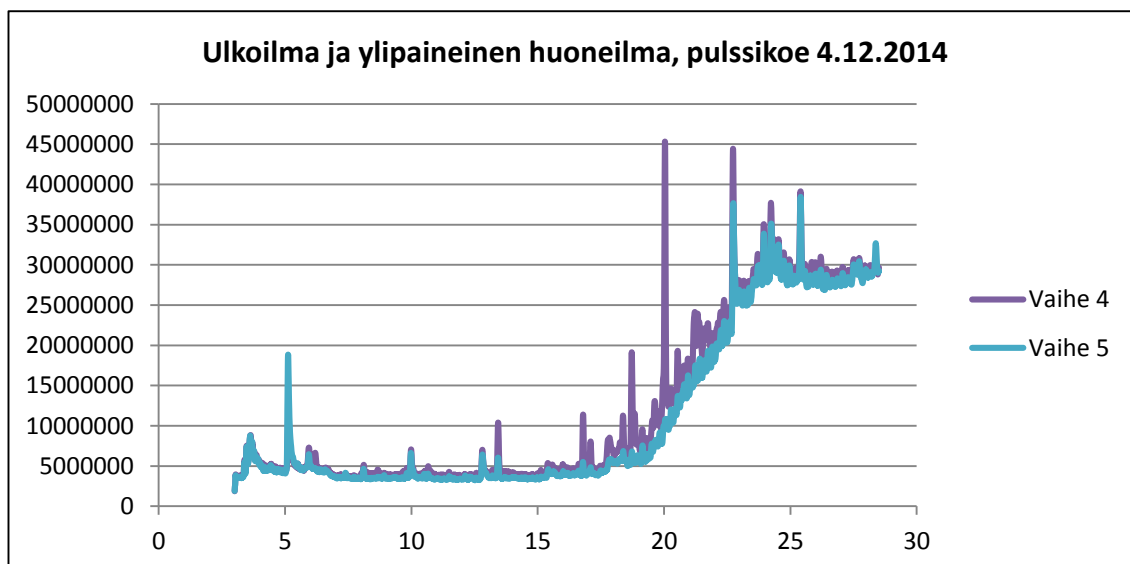
Kuva A1. Pulssikokeen vaiheiden 1 ja 5 kromatogrammit 4.12.2014 suoritettussa pilssikokeessa. Tenax-näytteet huoneen keskeltä. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.



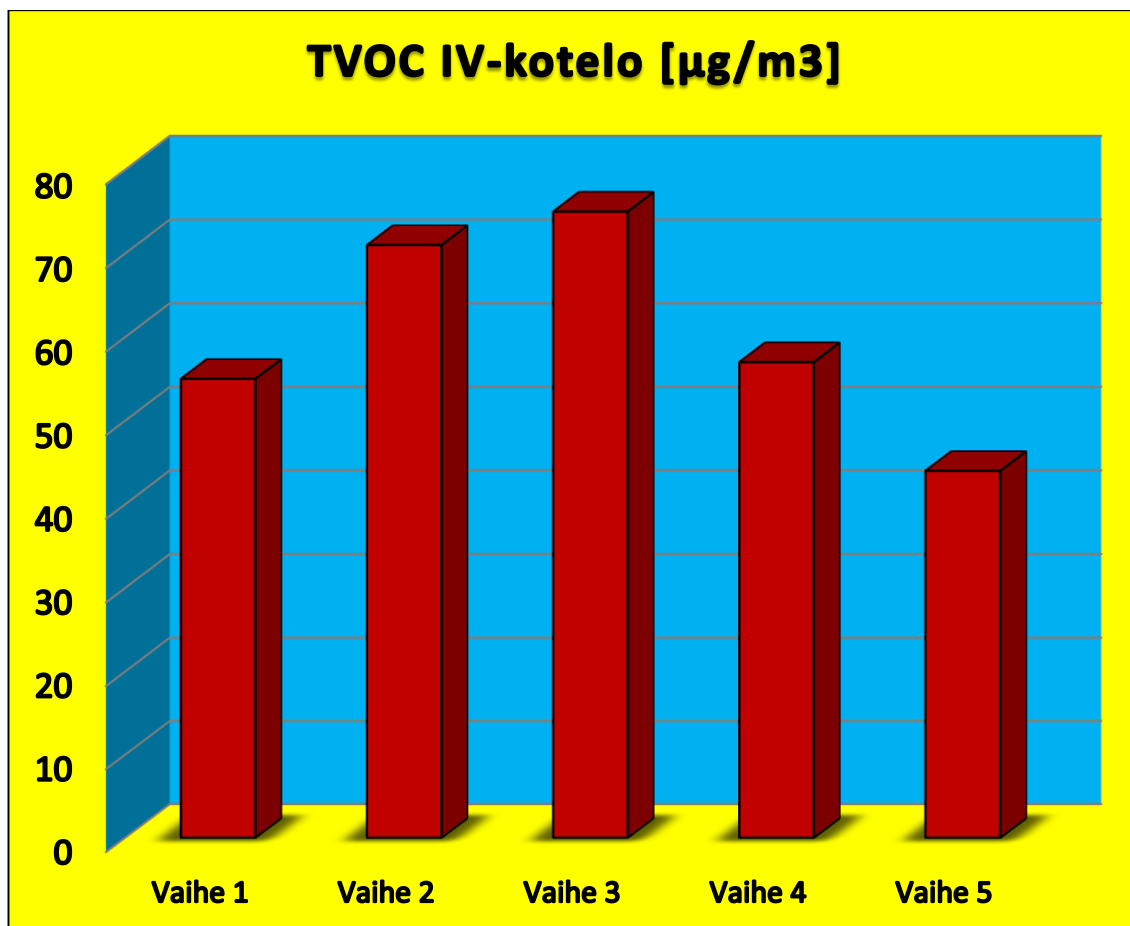
Kuva A2. Pulssikokeen vaiheiden 2 ja 5 kromatogrammit 4.12.2014 suoritettussa pilssikokeessa. Tenax-näytteet huoneen keskeltä. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.



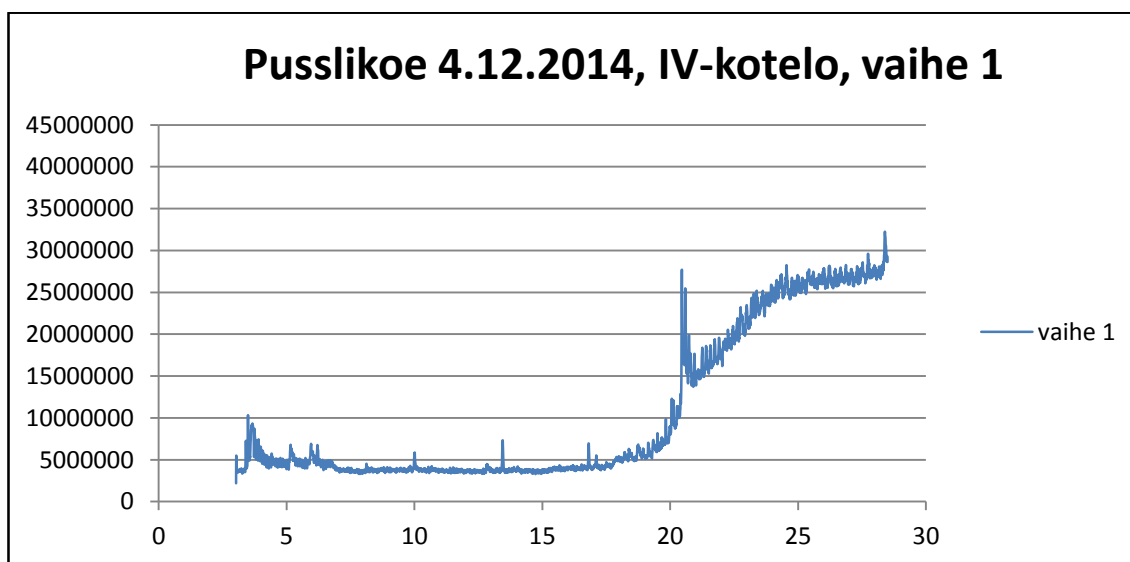
Kuva A3. Pulssikokeen vaiheiden 3 ja 5 kromatogrammit 4.12.2014 suoritetussa pilssikokeessa. Tenax-näytteet huoneen keskeltä. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.



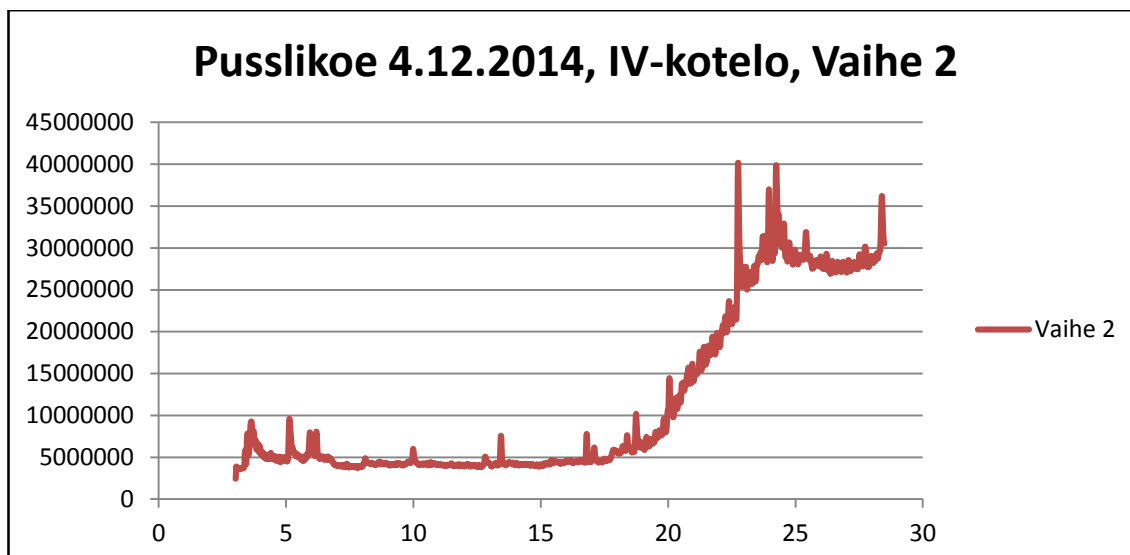
Kuva A4. Pulssikokeen vaiheiden 4 ja 5 kromatogrammit 4.12.2014 suoritetussa pilssikokeessa. Tenax-näytteet huoneen keskeltä. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.



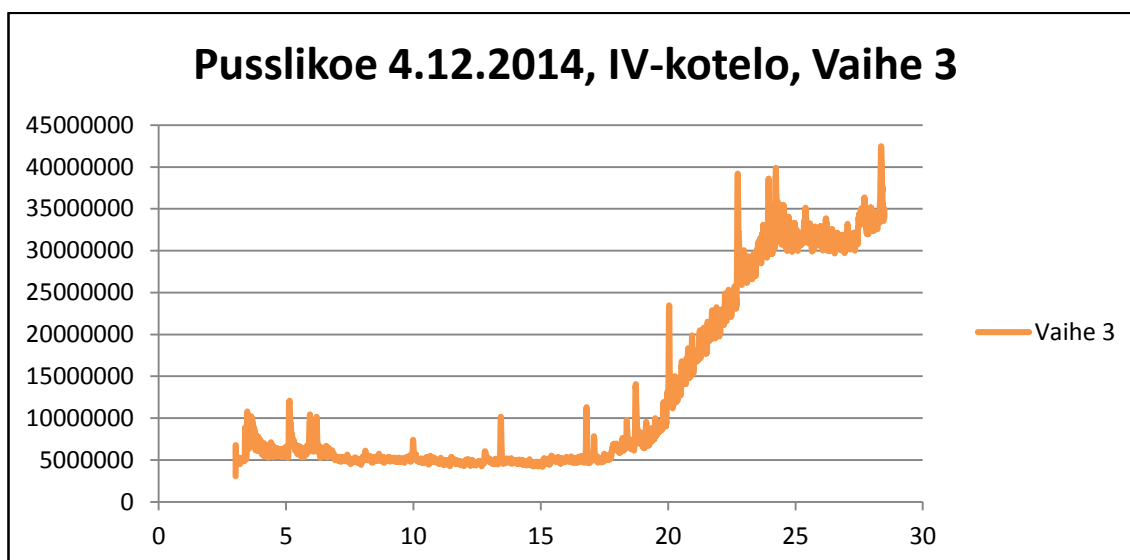
Kuva A5. Eri Vaiheiden TVOC-tasot 4.12.2014 suoritetussa pulssikokeessa. Tenax TA näytteet otettu tutkimuskohteen alaslasketun katon IV-kotelosta.



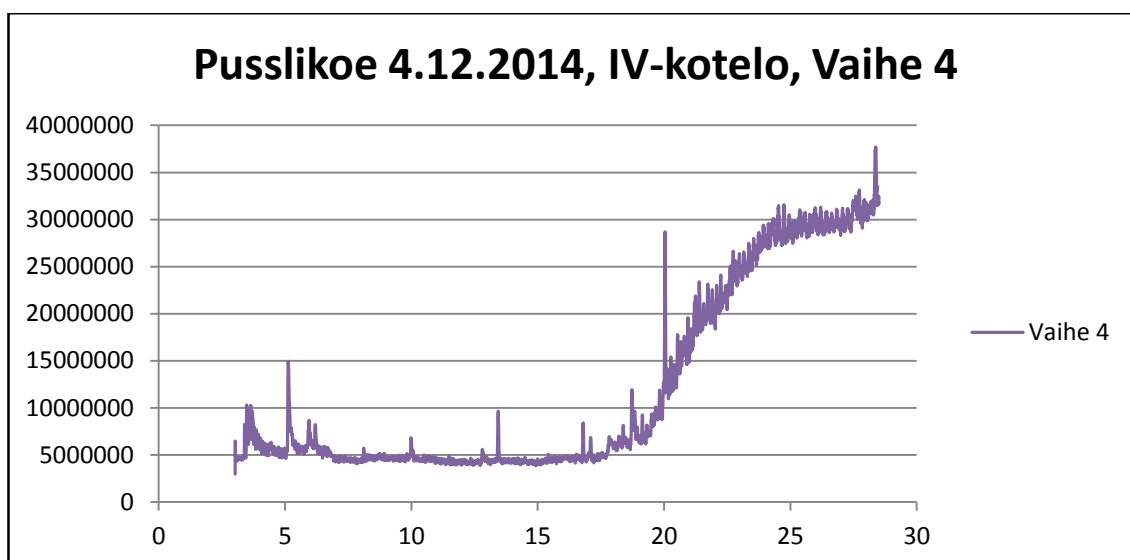
Kuva A6. Pulssikokeen vaiheen 1 kromatogrammi 4.12.2014 suoritetussa pilssikokeessa. Tenax TA näytteet otettu huoneen IV-kotelosta. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.



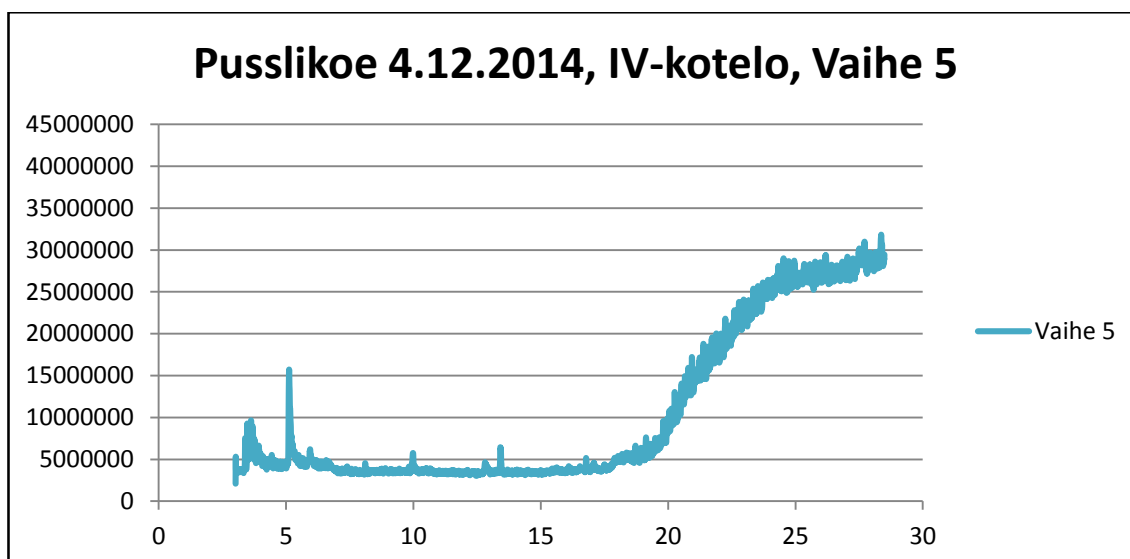
Kuva A7. Pulssikokeen vaiheen 2 kromatogrammi 4.12.2014 suoritetussa pilssikokeessa. Tenax TA näytteet otettu huoneen IV-kotelosta. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.



Kuva A8. Pulssikokeen vaiheen 3 kromatogrammi 4.12.2014 suoritetussa pilssikokeessa. Tenax TA näytteet otettu huoneen IV-kotelosta. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.

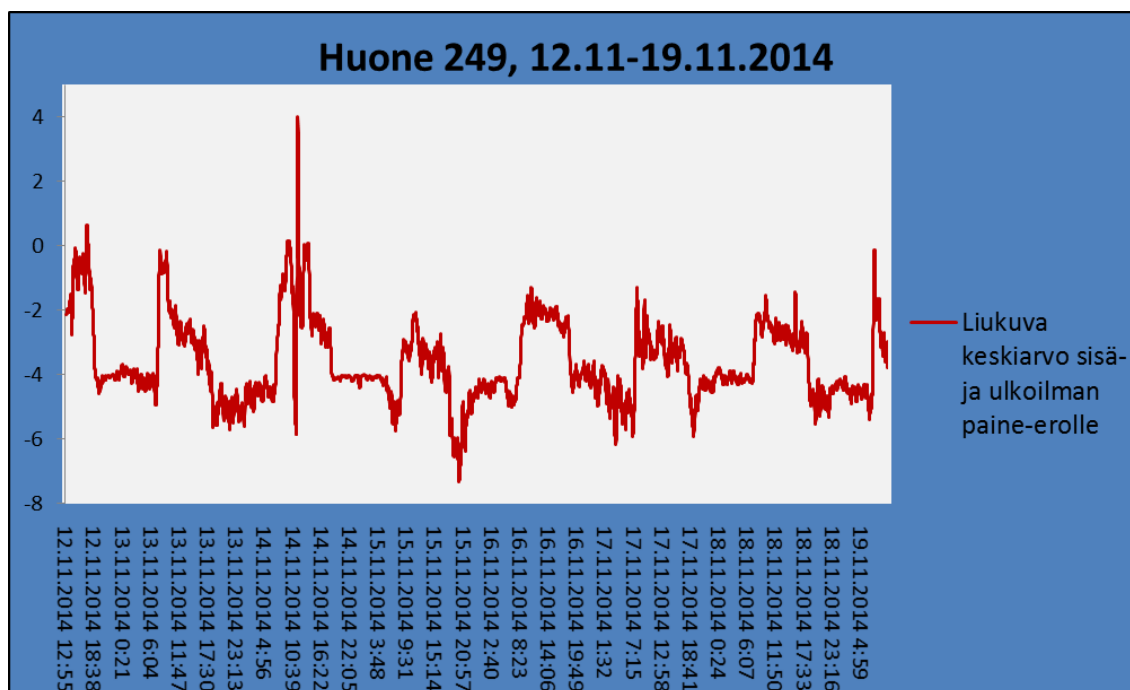


Kuva A9. Pulssikokeen vaiheen 4 kromatogrammi 4.12.2014 suoritetussa pilssikokeessa. Tenax TA näytteet otettu huoneen IV-kotelosta. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.

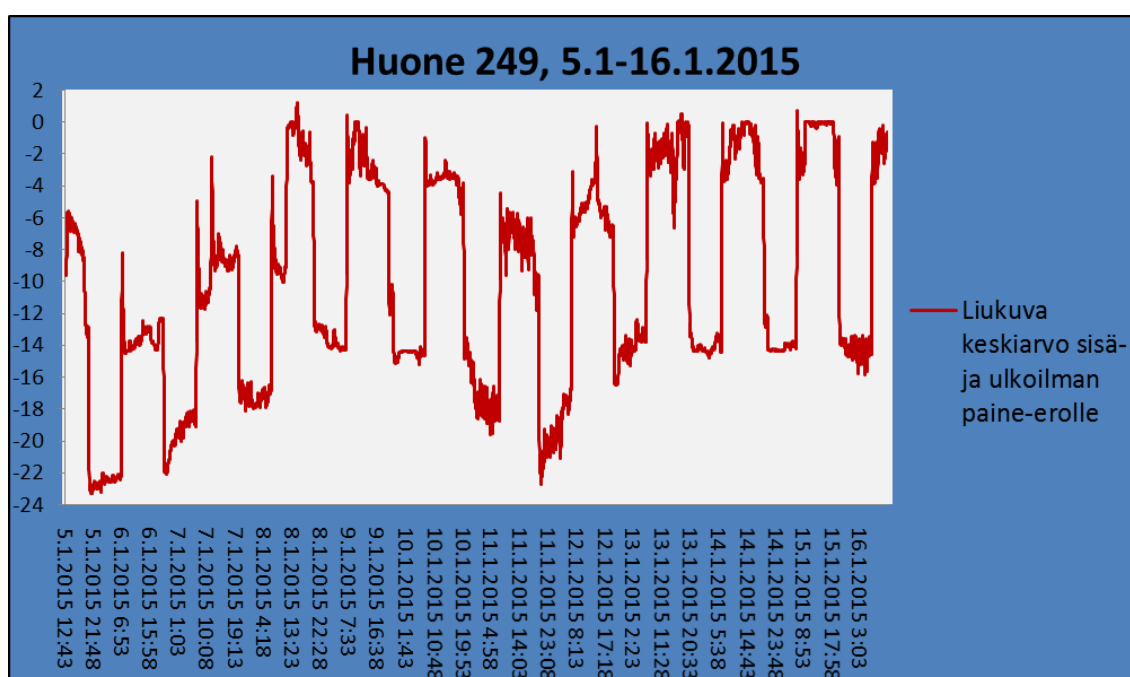


Kuva A10. Pulssikokeen vaiheen 5 kromatogrammi 4.12.2014 suoritetussa pilssikokeessa. Tenax TA näytteet otettu huoneen IV-kotelosta. Pystyakselilla on yhdisteiden intensiteetti ja aika-akselilla yhdistettä vastaava retentioaika.

Liite B. Tutkimuskohteen paineolosuhteiden seurantamittausten tulokset.

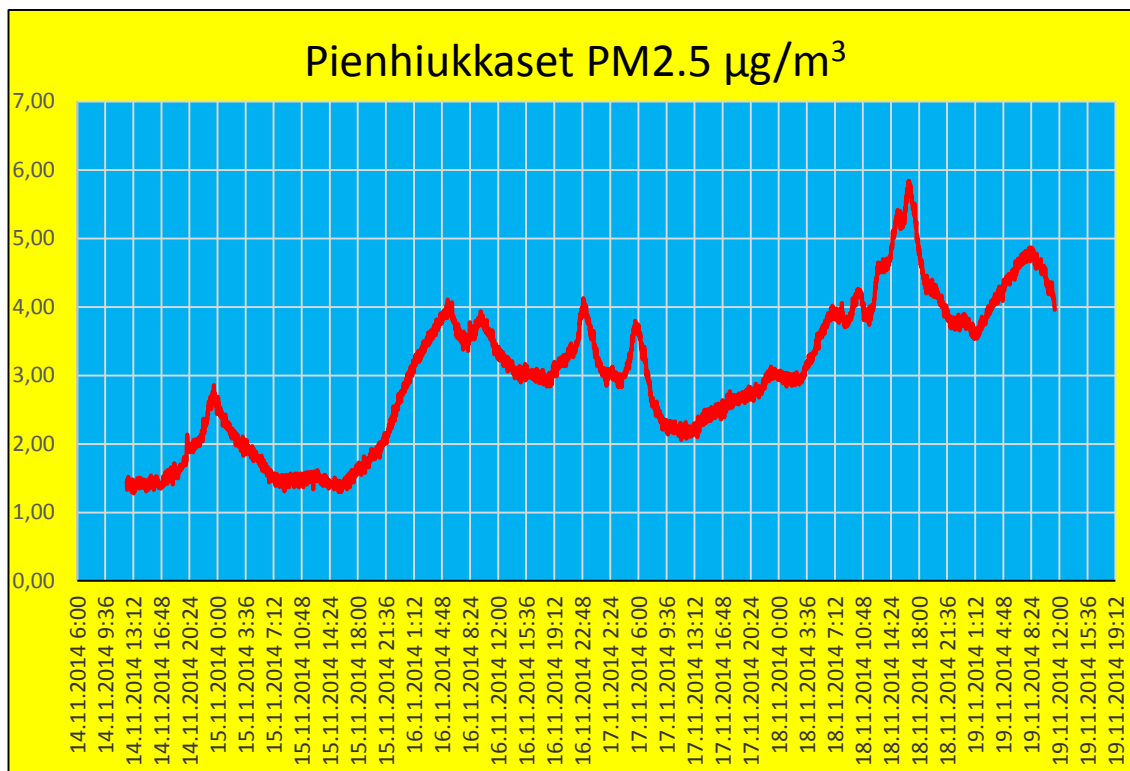


Kuva B1. Tutkimuskohteen sisäilman ja sen välittömässä läheisyydessä olevan ulkoilman välinen paine-ero 12.11.2014 - 19.11.2014. Paine-eron mittaustuloksista on piirretty trendilinja, joka vastaa tuloksista saatujen arvojen liukuvaa keskiarvoa.

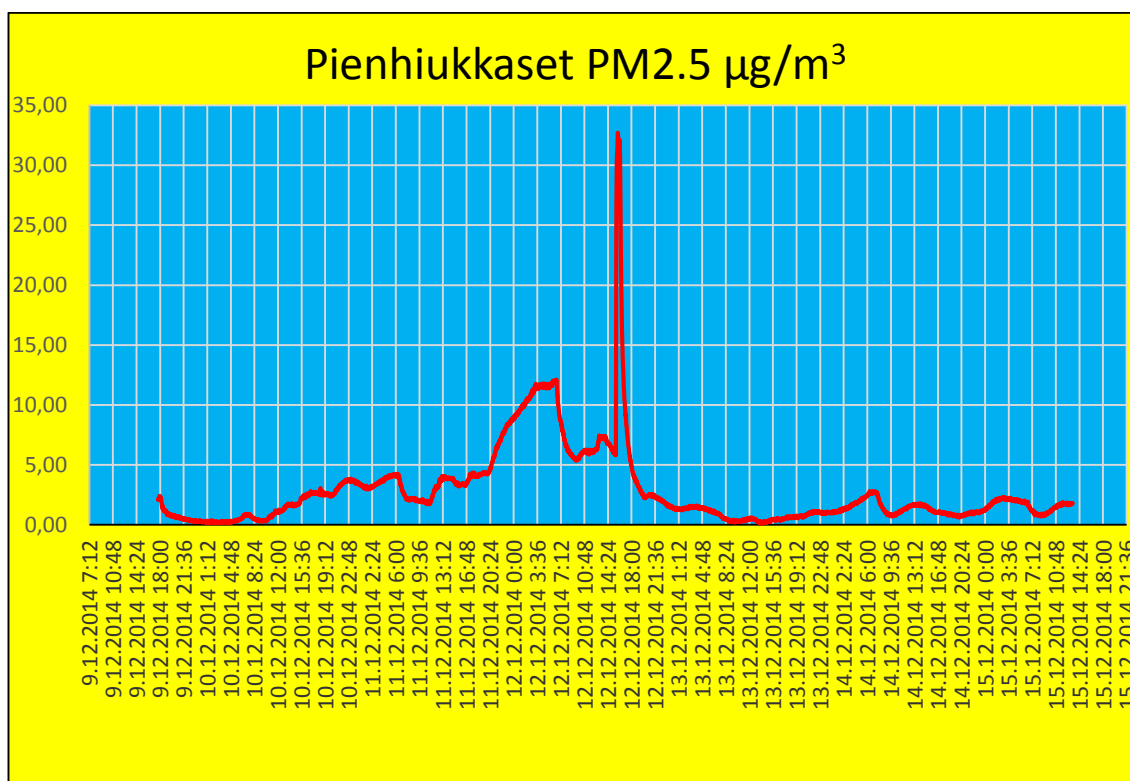


Kuva B2. Tutkimuskohteen sisäilman ja sen välittömässä läheisyydessä olevan ulkoilman välinen paine-ero 5.1.2015 - 16.1.2015. Paine-eron mittaustuloksista on piirretty trendilinja, joka vastaa tuloksista saatujen arvojen liukuvaa keskiarvoa.

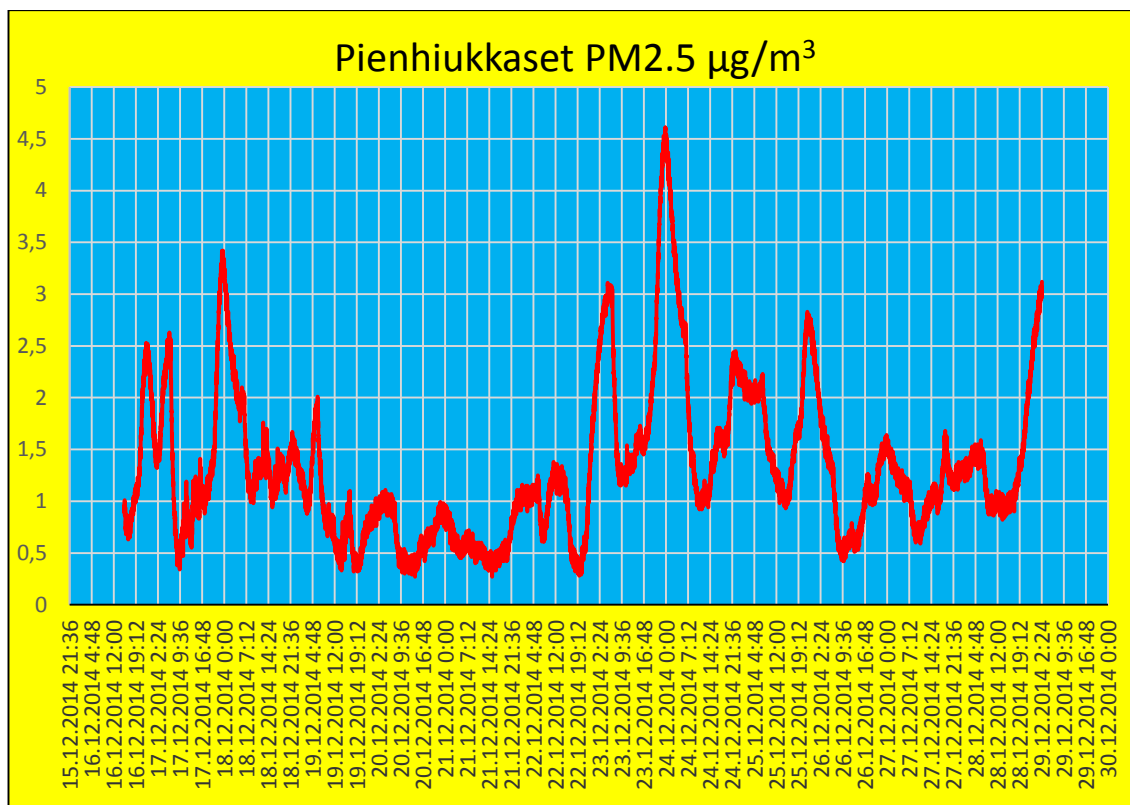
Liite C. Tutkimuskohteen sisäilman pienhiukkaspitoisuuksien mittaustulokset.



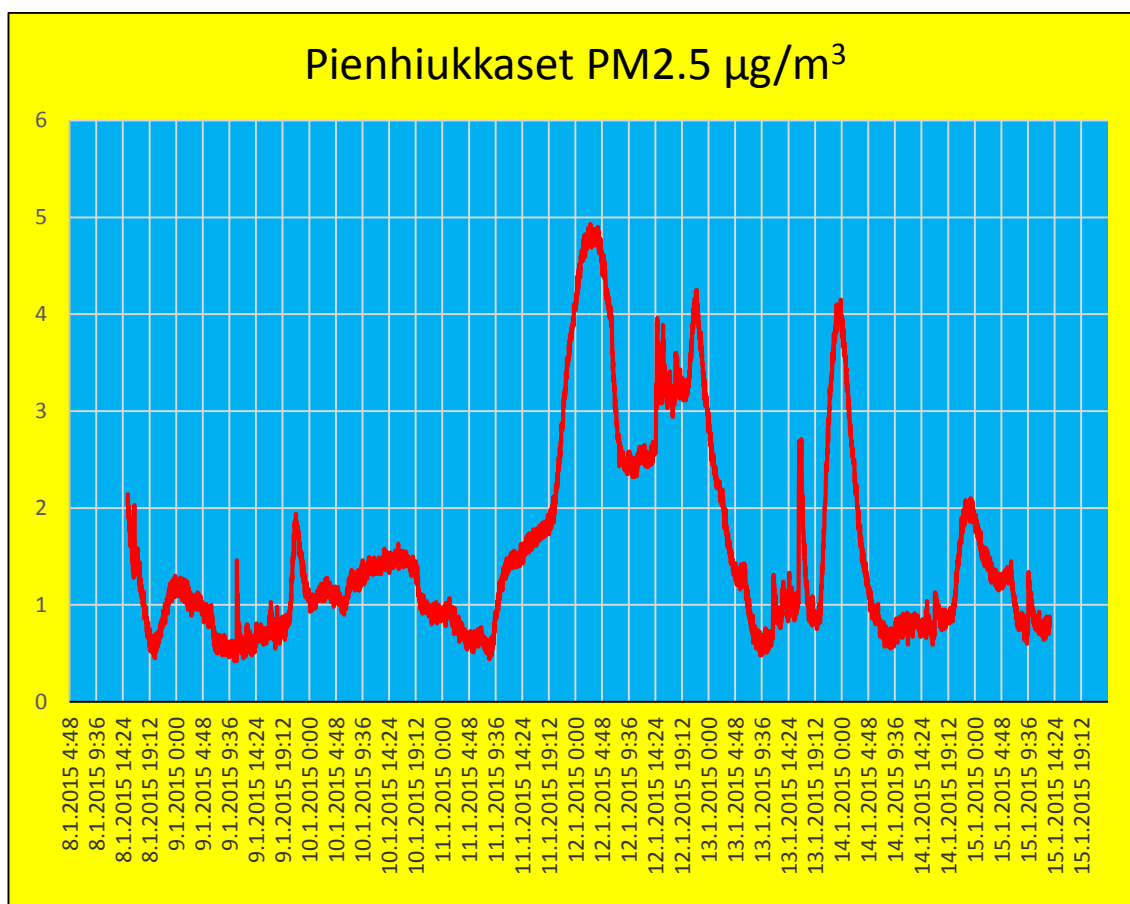
Kuva C1. Tutkittavan huoneen PM2.5-pitoisuudet aikavälillä 14.11.2014 - 19.11.2014.



Kuva C2. Tutkittavan huoneen PM2.5-pitoisuudet aikavälillä 9.12.2014 - 15.12.2014.

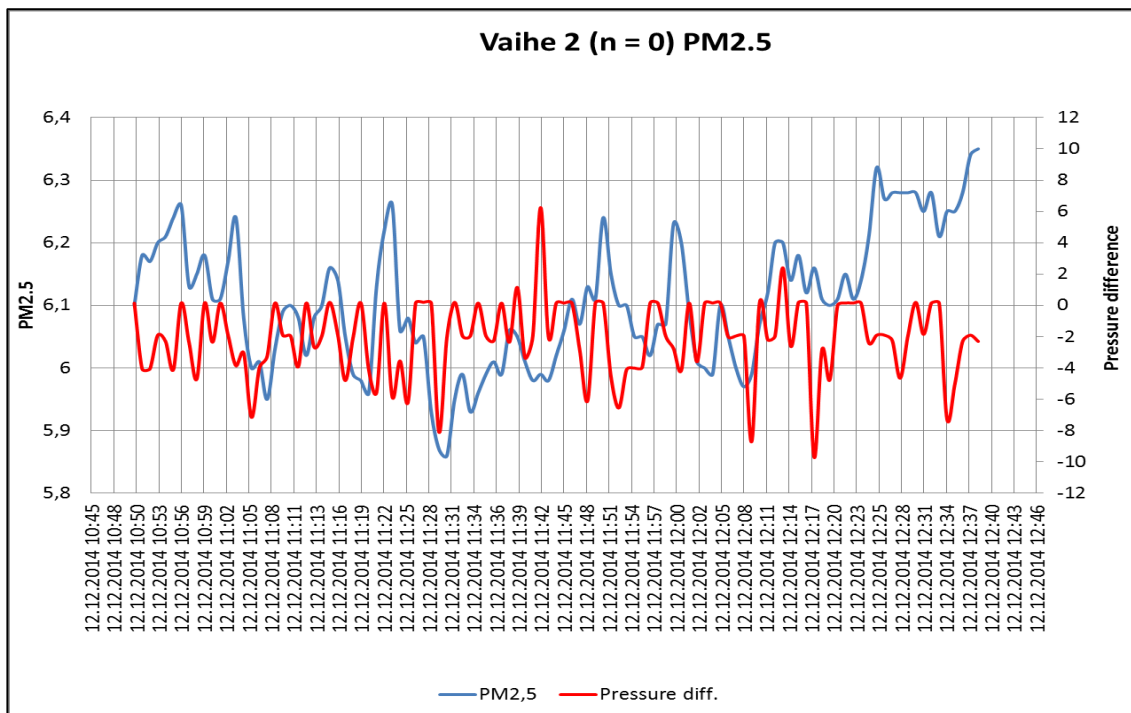


Kuva C3. Tutkittavan huoneen PM2.5-pitoisuudet aikavälillä 15.12.2014 - 30.12.2014.

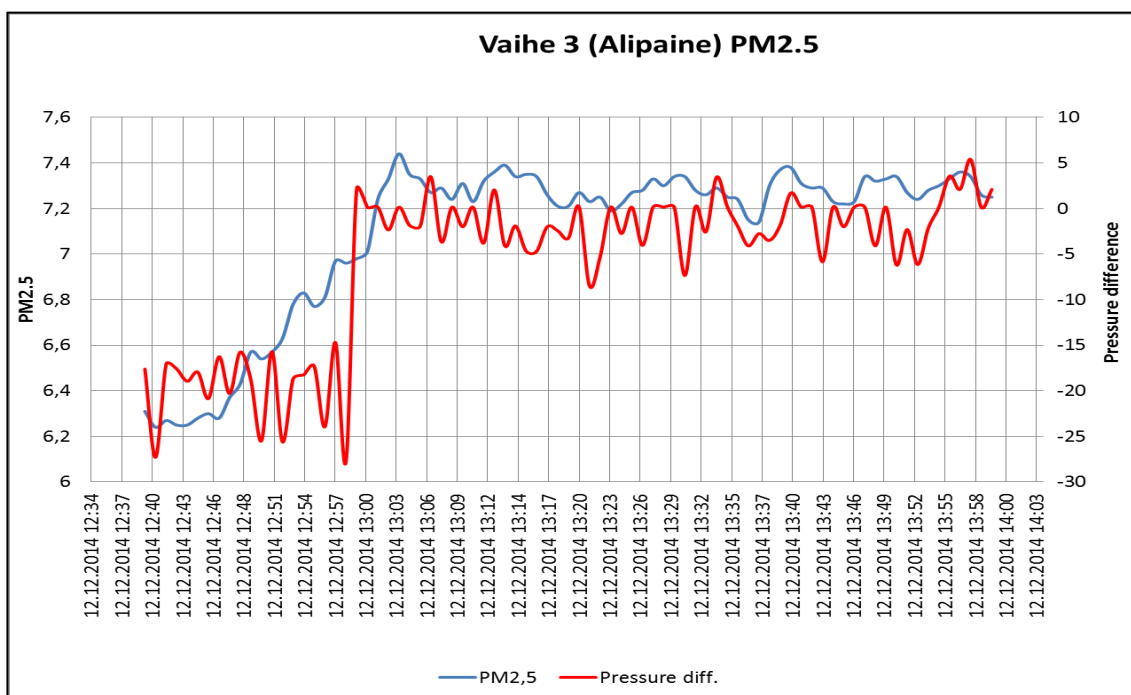


Kuva C4. Tutkittavan huoneen PM2.5-pitoisuudet aikavälillä 8.1.2015 - 15.1.2015.

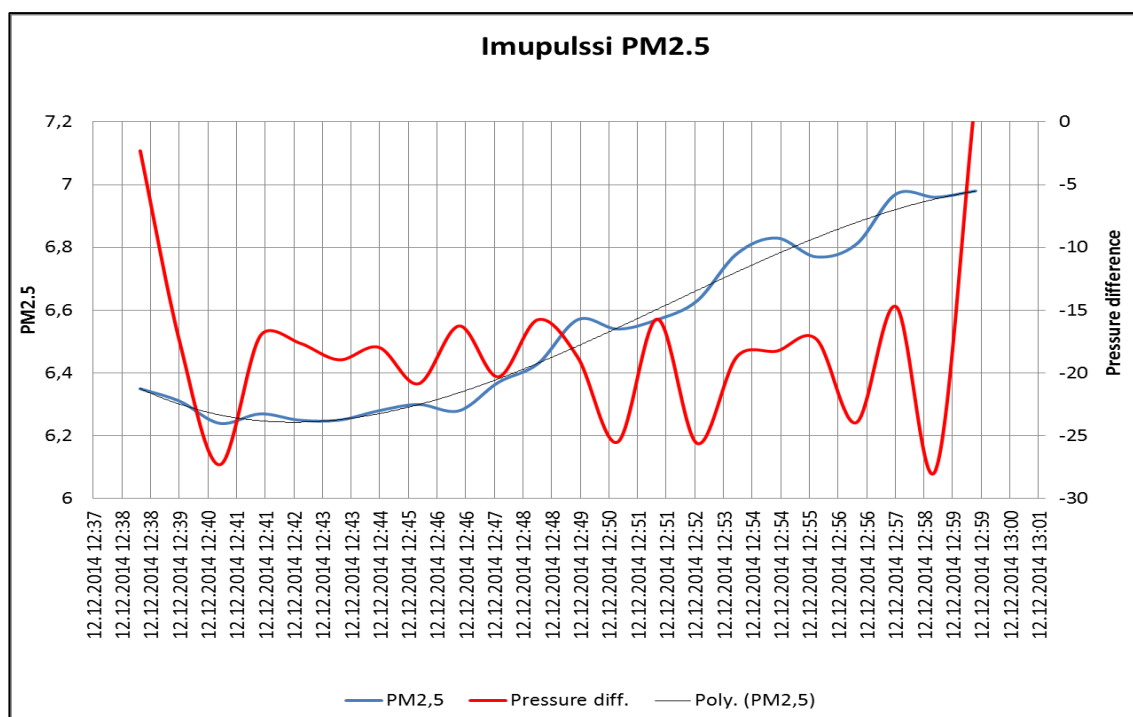
Liite D. Pulsikoe 12.12.2014. Pienhiukkasten ($PM_{2.5}$) pitoisuudet eri vaiheissa



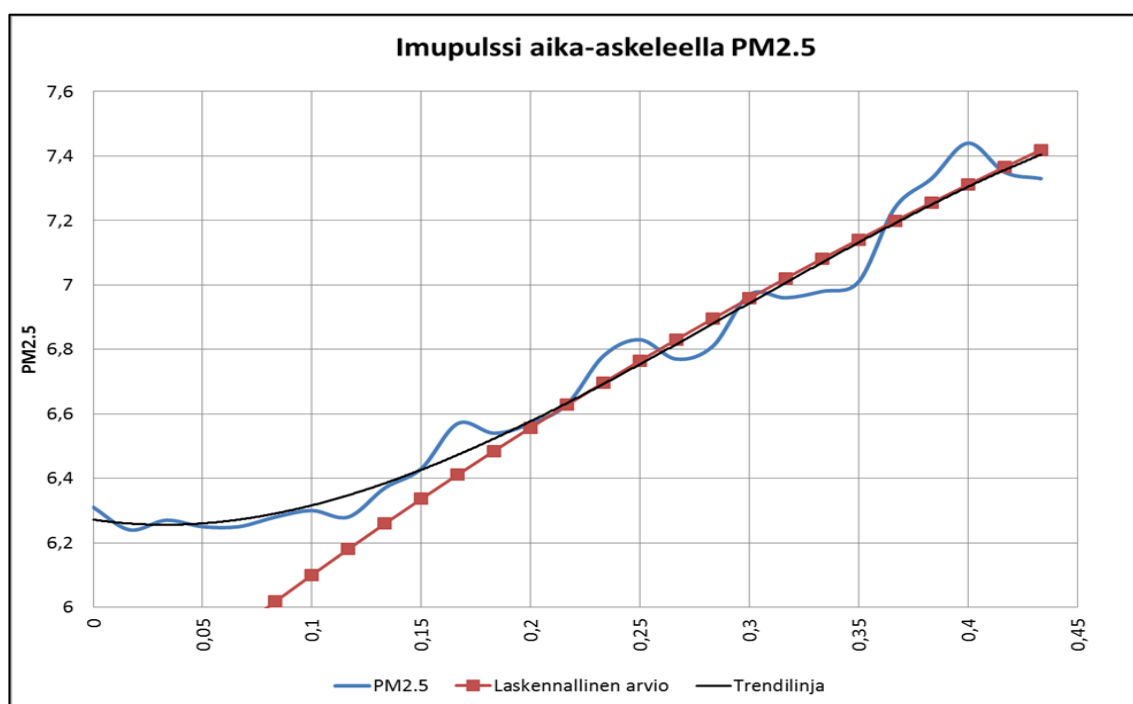
Kuva D1. Pulsikokeen $PM_{2.5}$ -pitoisuudet sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero vaiheessa 2. Koesarja suoritettiin 12.12.2014.



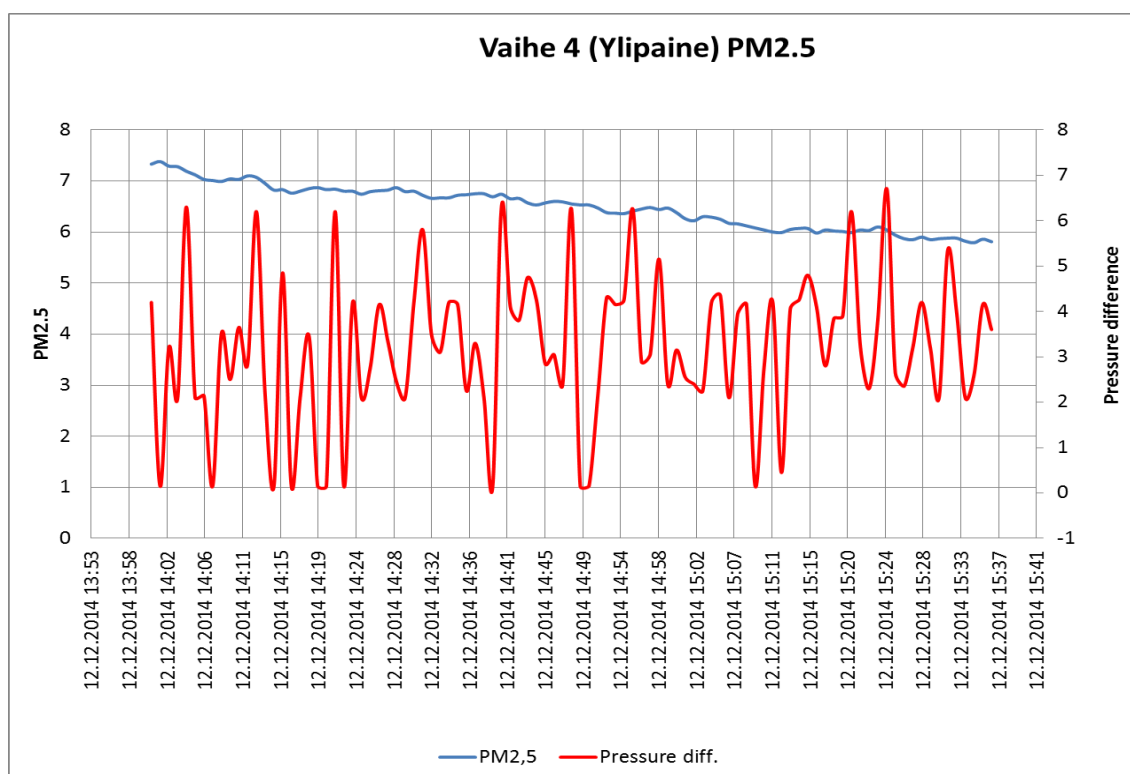
Kuva D2. Pulsikokeen $PM_{2.5}$ -pitoisuudet sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero vaiheessa 3. Koesarja suoritettiin 12.12.2014.



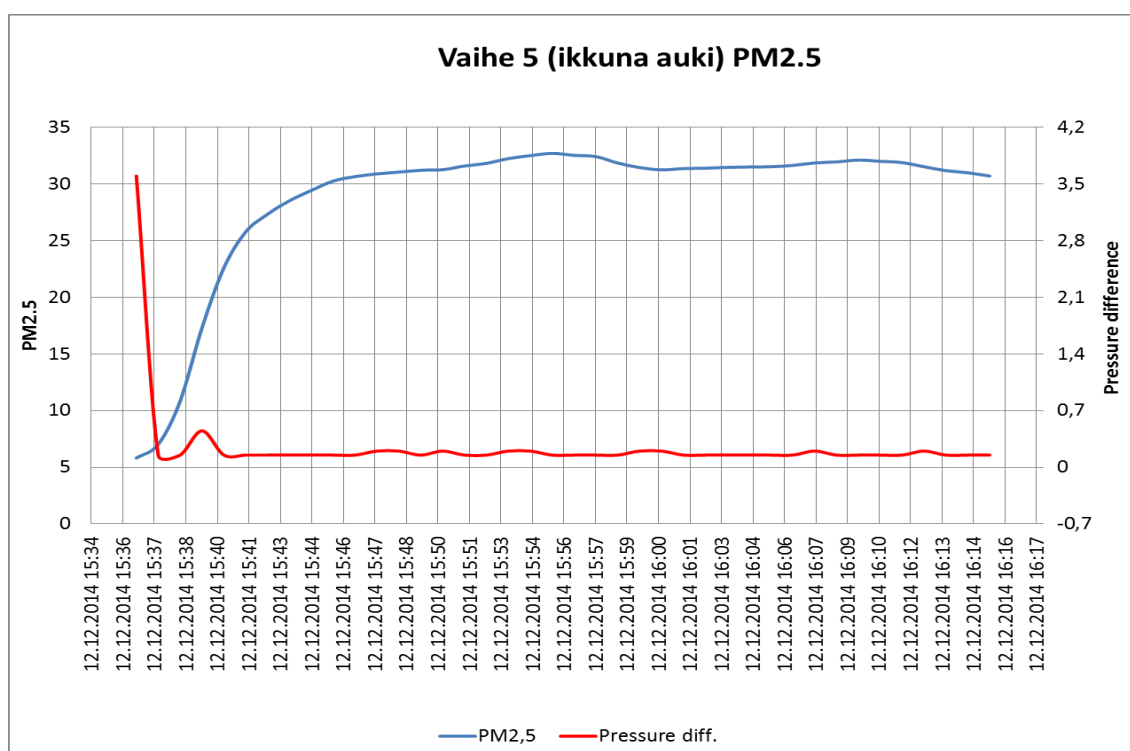
Kuva D3. Pulsikokeen PM_{2.5}-pitoisuudet sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero vaiheessa 3. Koesarja suoritettiin 12.12.2014.



Kuva D4. Pulsikokeen PM_{2.5}-pitoisuudet sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero vaiheessa 3, tarkastelujakson ollessa noin 20 minuutin ajanjakso, jossa tutkimuskohde oli alipaineinen. Trendilinja kuvaa PM_{2.5}-pitoisuuden liukuvaa keskiarvoa. Koesarja suoritettiin 12.12.2014.



Kuva D5. Pulsikokeen PM_{2,5}-pitoisuudet sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero vaiheessa 4. Koesarja suoritettiin 12.12.2014.



Kuva D6. Pulsikokeen PM_{2,5}-pitoisuudet sekä sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero vaiheessa 5. Koesarja suoritettiin